ТОМ 2, №4, 2023 eISSN 2949-1835
РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий

Строительные конструкции, здания и сооружения

Основания и фундаменты, подземные сооружения

Строительные материалы и изделия

Технология и организация строительства

Строительная механика

Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов

Управление жизненным циклом объектов строительства



www.stsg-donstu.ru
DOI 10.23947/2949-1835



Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2022 года)

eISSN 2949-1835
DOI: 10.23947/2949-1835

Том 2, № 4, 2023

Журнал создан в целях информирования читательской аудитории о новейших достижениях, тенденциях и перспективах в области строительства, архитектуры, градостроительства и смежных научных направлений. Издание является платформой для научно-образовательного сотрудничества российских и иностранных исследователей, вовлеченных в строительную сферу.

В журнале публикуются научные статьи по следующим специальностям:

– Строительные конструкции, здания и сооружения;
– Основания и фундаменты, подземные сооружения;
– Строительные материалы и изделия;
– Технология и организация строительства;
– Строительная механика;
– Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов;
– Управление жизненным циклом объектов строительства.

Индексация:	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef
Наименование органа, зарегистрировавшего издание	*Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 83923 от 16 сентября 2022 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций*
Учредитель и издатель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)
Периодичность	4 выпуска в год
Адрес учредителя и издателя	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
E-mail	sovtrendstr@gmail.com
Телефон	+7 (863) 2–738–372
Сайт	http://www.stsg-donstu.ru/
Дата выхода в свет	20.12.2023





Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning

Pee-reviewed scientific and practical journal (published since 2022)

eISSN 2949-1835
DOI: 10.23947/2949-1835

Vol. 2, no. 4, 2023

A peer-reviewed scientific and practical journal designed to inform the readers about the latest advancements. Trends and prospects in the field of construction, architecture, urban and adjacent scientific fields. The journal serves a platform for scientific and educational of researchers and scholars engaged in field of construction.

The journal publishes articles covering the results of the cutting-edge research in the following areas:

– Building constructions, buildings and engineering structures,
– Bases and foundations, subsurface structures,
– Construction materials and products,
– Technology and organization of construction,
– Structural mechanics,
– Urban planning, rural settlements planning,
– Facilities life cycle management.

Indexing:	RSCI, CyberLeninka, CrossRef
Name of the body that registered the publication	*Mass media registration certificate ЭЛ № ФС 77 – 83923 dated September 16, 2022, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media*
Founder and publisher	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU)
Periodicity	4 issues per year
Address of the founder and publisher	1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
E-mail	sovtrendstr@gmail.com
Telephone	+7 (863) 2–738–372
Website	http://www.stsg-donstu.ru/
Date of publication	December, 20, 2023



СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ



Check for updates

Научная статья

УДК 624.012.04-52
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-7-18

Исследование эффективности композитного продольного и поперечного усиления при увеличении прочности и жесткости гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек


С.В. Георгиев ✉, Д.Р. Маилян, А.И. Соловьева

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ sergey.georgiev@bk.ru

Аннотация

Введение. Использование композитных материалов для повышения эксплуатационных характеристик строительных конструкций при реконструкции в последние годы постепенно вытесняет методы, разработанные еще в середине XX века и основанные на использовании для этих целей железобетона и металла. Однако нормативная база, регламентирующая процесс усиления несущих конструкций зданий и сооружений, разработана на основе недостаточного количества экспериментальных данных. Это привело к тому, что большой объем конструкций, выходящих за нормативные ограничения, невозможно усиливать композитными материалами или это приводит к существенным экономическим затратам. Таким образом, экспериментальные исследования в области усиления композитными материалами железобетонных конструкций являются перспективными и актуальными на сегодняшний день. Целью настоящей работы стал анализ результатов ряда экспериментов, проведенных для исследования применения композитных материалов в строительстве и их эффективности.

Материалы и методы. Для определения напряжения в композитных углеродных материалах внешнего армирования внецентренно сжатых железобетонных стоек были проведены испытания четырех опытных образцов. Все образцы имели разные схемы усиления. В наиболее характерных зонах работы композитных материалов были наклеены тензодатчики с базой 2 см, которые считывали изменения относительных деформаций на каждом уровне нагрузки в процессе испытания образцов. На каждую конструкцию наклеивалось от 10 до 16 тензодатчиков в зависимости от важности зон определения деформаций.

Результаты исследования. В работе приведены результаты исследований определения эффективности композитного продольного и поперечного усиления на увеличение жесткости и прочности гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек. Приведены экспериментальные данные прочности, прогибов и относительных деформаций композитных материалов, полученных при испытании четырех железобетонных стоек. Выполнена оценка эффективности композитного усиления при 3предельной прочности и допустимых прогибах. Определены относительные деформации в композитных материалах и произведена оценка включения системы усиления в работу железобетонных усиленных образцов.

Обсуждение и заключение. На основании полученных результатов выполнен анализ эффективности композитного усиления и разработаны предложения по проектированию систем усиления гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек, работающих с большими эксцентриситетами приложения нагрузки.

Ключевые слова: углепластик, бетон, железобетон, сталь, композитная арматура, усиление, деформации, напряжение

Для цитирования. Георгиев С.В., Маилян Д.Р., Соловьева А.И. Исследование эффективности композитного продольного и поперечного усиления при увеличении прочности и жесткости гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):7–18. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-7-18

Original article

Studying the Efficiency of Composite Longitudinal and Transverse Reinforcement for Increasing the Strength and Rigidity of Flexible Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Poles

Sergey V. Georgiev ✉, **Dmitry R. Mailyan**, **Anastasia I. Solovyova**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ sergey.georgiev@bk.ru

Abstract

Introduction. In recent years, the use of composite materials for improving the operational properties of the building constructions within the restoration process is gradually replacing the methods, developed for this purpose in the middle of the XXth century and implying the use of reinforced concrete and metal. However, the regulatory framework stipulating the process of strengthening the loadbearing structures of buildings and structures was developed based on the insufficient amount of experimental data. Due to this fact, the large number of structures, exceeding the normative limits, cannot be strengthened with the composite materials, or such strengthening incurs significant economic costs. Thus, nowadays, the experimental studies on strengthening the reinforced concrete structures with composite materials are considered to be forward-looking and relevant. The aim of this study is to analyse the results of a number of experiments conducted to investigate the use and efficiency of composite materials in construction.

Materials and Methods. To determine the level of stress in composite carbon materials of the external reinforcement of the eccentrically compressed reinforced concrete poles, the tests were carried out with four specimens. All specimens were strengthened using different reinforcement schemes. The strain gauges with 2 cm active measuring grid length were installed in the zones of the most evident work of the composite materials to measure the changes of relative deformation at each load level during testing of the specimens. From 10 to 16 strain gauges were installed at each structure, depending on the importance of the zones for determining the deformations.

Results. The work presents the results of the study on determining the efficiency of composite longitudinal and transverse reinforcement for increasing the rigidity and strength of flexible eccentrically compressed reinforced concrete poles. The experimental data on the composite materials' strength, deflections and relative deformations, obtained during testing of four reinforced concrete poles, is presented. The efficiency of composite reinforcement at ultimate strength and ultimate deflections is assessed. The relative deformations in composite materials are determined and the inclusion of the reinforcement system in the work of the strengthened reinforced concrete specimens is assessed.

Discussion and Conclusion. Based on the obtained results, the analysis of the composite reinforcement efficiency has been carried out, and proposals have been developed on designing the reinforcement systems of the flexible eccentrically compressed reinforced concrete poles working with the large eccentricities of the load application.

Keywords: carbon fiber-reinforced plastic, concrete, reinforced concrete, steel, composite reinforcement, strengthening, deformation, stress

For citation. Georgiev SV, Mailyan DR, Solovyova AI. Studying the Efficiency of Composite Longitudinal and Transverse Reinforcement for Increasing the Strength and Rigidity of Flexible Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Poles. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):7–18. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-7-18

Введение. В современном строительстве все работы, относящиеся к реконструкции, условно можно разделить на два направления: возведение новых и восстановление или усиление существующих строений [1–3]. Последнее, особенно актуально в условиях тесной городской застройки, где работы по сносу зданий и строительству новых связаны с существенными затратами [4–6], что особенно важно при частичном усилении несущих конструкций зданий [7, 8].

Наиболее популярным материалом для изготовления конструкций зданий является железобетон [9–11]. Его высокие прочностные свойства и хорошее сопротивление к воздействию агрессивных факторов окружающей среды [12], а также доступность и низкая стоимость материалов приводят к тому, что в подавляющем числе строящихся объектов несущие конструкции изготовлены из железобетона. С ростом объемов строительства растет и число объектов, где требуется проводить усиление [13].

При выборе метода усиления наиболее важным фактором является его технико-экономическое обоснование. Из существующих методов наиболее надежным является усиление железобетонными обоймами [14, 15], однако данный метод усиления достаточно трудоемкий в связи со сложностью производства работ, а в ряде случаев является экономически не целесообразным. Другой метод усиления базируется на использовании металлических обойм [16, 17]. Этот метод является дорогостоящим из-за высокой стоимости металла и сложности сварочных работ. Применяется, когда требуется увеличение несущей способности конструкций до 50 %.

Наряду с приведенными выше традиционными методами усиления в настоящее время набирает популярность использование композитных материалов [18–20]. Известные системы композитного усиления, основанные на использовании углеткани, позволяют существенно сократить сроки производства работ, а особенность технологии производства работ позволяет не останавливать производственные процессы в помещениях зданий, где производится усиление [21].

В области проектирования сжатых элементов наиболее распространенными являются конструкции малой гибкости, работающие с небольшими эксцентриситетами приложения нагрузки. Такие конструкции эффективно усиливаются композитными материалами с расположением волокон углеткани в поперечном направлении [22, 23].

В 2014 году был опубликован свод правил по усилению железобетонных конструкций композитными материалами, который регламентировал порядок и методы расчетной оценки усиленных железобетонных конструкций на законодательном уровне. Однако высокая эффективность композитного поперечного усиления достигается в соответствии с СП только в конструкциях малой гибкости и работающих с эксцентриситетом приложения нагрузки, не превышающем 0,1 h. Такие ограничения существенно снижают перечень реальных конструкций, для которых рекомендуется использовать композитное усиление. К таким конструкциям относятся опоры эстакад и путепроводов, колонны промышленных зданий с мостовыми кранами, фахверки и конвейерные системы и др. [24].

С целью определения эффективности композитного усиления конструкций, эксплуатационные характеристики которых выходят за ограничения свода правил, были изготовлены, усилены композитными материалами фирмы «BASF» и испытаны ряд железобетонных стоек. Гибкость опытных элементов выходит за предельно допустимые значения ограничений свода правил $\lambda_i = 66 > 50$. Аналогично и значение эксцентриситета приложения нагрузки принималась равным 0,16 h, что больше нормативного 0,1 h.

В процессе выполнения эксперимента наибольшее внимание уделялось определению коэффициентов усиления по предельной прочности и уровню нагрузки при предельных прогибах, а также определение значений относительных деформаций в композитных материалах в процессе испытания. Последнее позволило определить уровень напряжения в композитных материалах с целью определения наиболее эффективных схем внешнего композитного армирования.

Помимо поперечного усиления в эксперименте исследовалось влияние продольного усиления, состоящие из двух углеродных ламелей. К тому же с целью определения возможности расширения положения норм были изучены новые, не охваченные нормами, схемы усиления.

Целью данного научного исследования является определение наиболее эффективных схем усиления гибких внецентренно-сжатых железобетонных стоек, работающих с большим эксцентриситетом приложения нагрузки, и разработка предложений по рациональному армированию конструкций системой композитного усиления.

Для осуществления поставленных целей были решены следующие задачи:

– изготовлены, усилены и испытаны железобетонные стойки;

– по результатам испытаний были определены предельные прочности и значения относительных деформаций композитных материалов на всех этапах загружения;

– построены графики отношения относительных деформаций к прочности (σ–ε) согласно полученным данным относительных деформаций композитных материалов;

– произведен анализ полученных результатов эксперимента и предложены рекомендации к применению системы усиления.

Материалы и методы. В качестве материалов исследования были взяты результаты испытаний шести опытных образцов. Один эталонный образец и пять образцов, усиленных разными вариантами композитного армирования, испытывались при эксцентриситете приложения нагрузки, равном 4,0 см (0,32 h).

Опытные образцы имели габариты 12,5×25×240 см. Внутреннее армирование состояло из четырех стержней арматуры класса А500 диаметром 12, поперечное — класса В500 диаметром 6, с шагом S1=180 мм. Защитный слой бетона составлял 2,5 см. В торцах устанавливались по шесть металлических сеток на приопорных участках для предотвращения смятия. Сетки устанавливались согласно результатам расчетов на местное сжатие.

Проектируемый класс бетона конструкций принимался В35. Экспериментальные значения прочности бетона, полученные по результатам испытания шести кубов с ребром 15×15 см, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытания опытных образцов

п/п №	Шифр стоек	Класс бетона B	Прочность $N_s; N_{s,f}$, кН	Прочность при прогибе 6 мм $N_s; N_{s,f}$, кН	Прогибы f^{exp},мм	Коэффициент усиления при прямом сопоставлении, k_{f1}	Коэффициент усиления при приведенной прочности бетона k_{f2} (R_b^s/R_b^c)	Коэффициент усиления при приведенной прочности бетона 6мм k_{f3}
1	ВГ	35,2	242,5	95	33,9	1,0	–	–
2	ВГУ–Х$_3$	35,2	290,0	150	31,4	1,2	1,2	1,58
3	ВГУ–Х$_5$	30,1	270	110	40,5	1,11	1,3	1,35
4	ВГУ–Х$_4$Lр	39,8	504,5	215	32,4	2,08	1,84	2,0

Все образцы испытывались ступенчато возрастающей нагрузкой (10–12 этапов) с выдержкой 5–10 минут на каждом этапе загружения.

Фото усиленных опытных образцов приведены на рис. 1, а описание системы композитного усиления приведено в таблице 1.



ВГ ВГУ–Х$_3$ ВГУ–Х$_5$ ВГУ–Х$_4$L$_р$

Рис. 1. Характер разрушения опытных образцов

Результаты исследования. Характер разрушения опытных образцов зависел от схемы композитного усиления. Фото разрушенных образцов приведены на рис 1. В таблице 1 представлены основные характеристики опытных образцов и результаты испытаний. На рис. 2–5 приведены схемы установки тензодатчиков на композитных материалах в наиболее нагруженных зонах (слева на рисунке) и графики изменения относительных деформаций по отношению к уровню нагрузки (справа на рисунке).

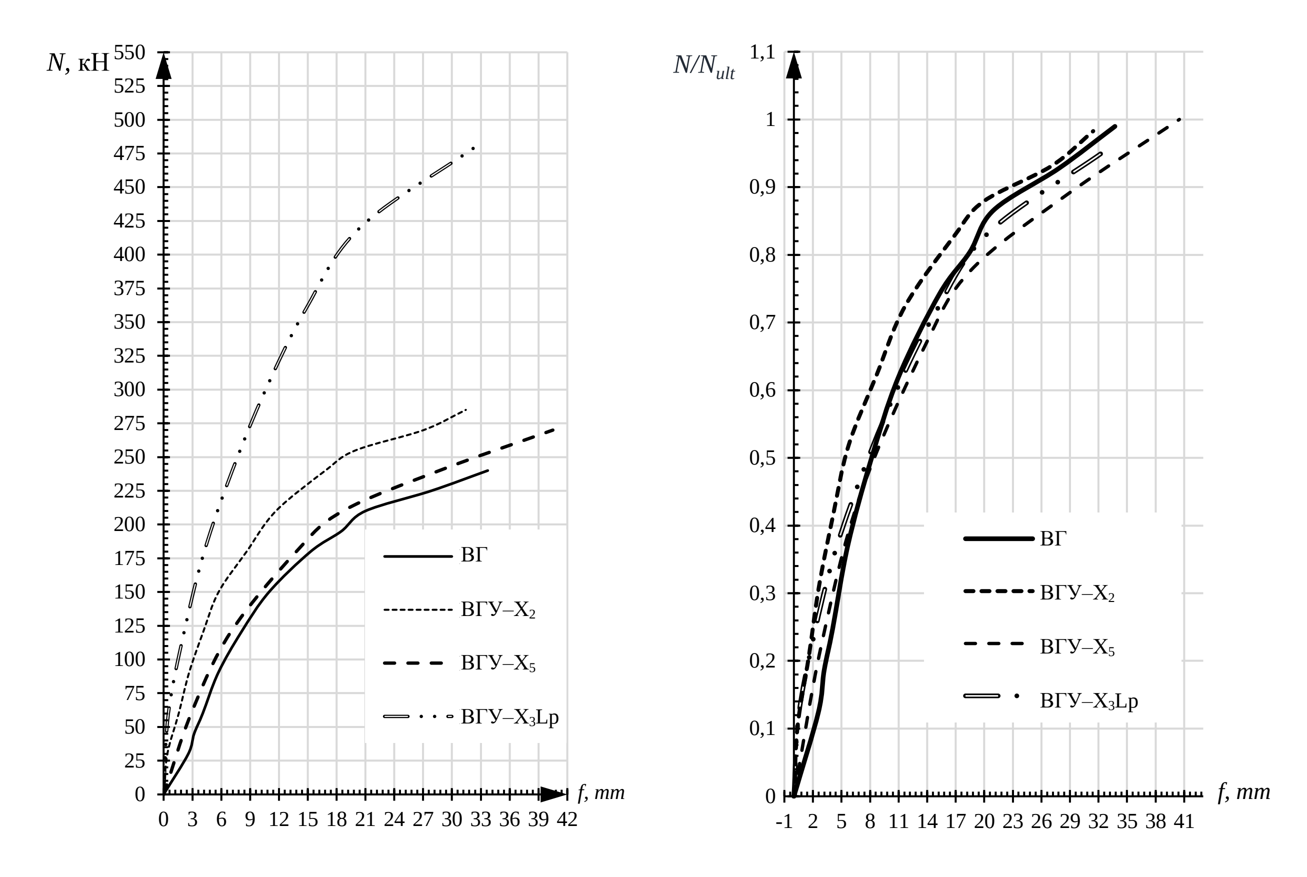


Рис. 2. Графики изменения прогибов опытных образцов при изменении уровня нагрузки (слева) и относительном уровне нагрузки N/N_{ult} (справа)

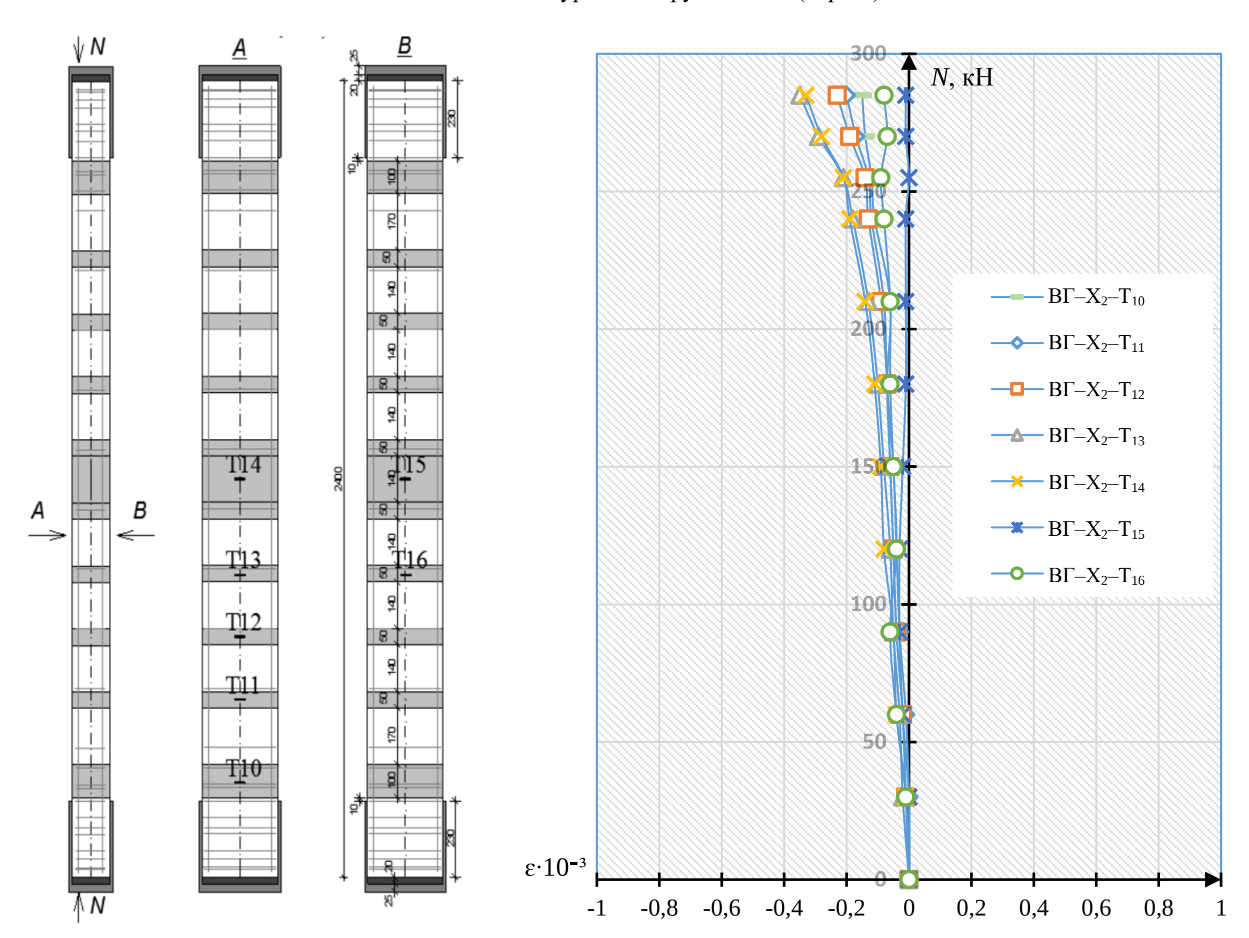


Рис. 3. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра ВГУ-Х₃

Для каждого образца представлено описание результатов изменения относительных деформаций в композитных материалах и поведение стойки в целом.

ВГУ–$Х_3$ — стойка, усиленная композитными материалами в поперечном направлении с расположением хомутов с шагом 190 мм, шириной 50 мм. На приопорном участке установлено два хомута шириной 100 мм. В центре хомут шириной 240 мм. Два хомута, расположенные в растянутой грани, показали относительную деформацию в пределах $0{,}08\times10^3$.

В сжатой зоне установленные тензодатчики показали самые большие относительные деформации в середине стойки. Значения относительных деформаций в тензодатчиках Т13 и Т14 были равны $0{,}38\times10^{-3}$. В остальных тензодатчиках относительные деформации уменьшались с $0{,}25\times10^{-3}$ до $0{,}08\times10^{-3}$ по мере приближения хомутов к краю конструкции.

ВГУ–$Х_3L_р$ — железобетонная стойка усилена поперечными композитными хомутами и полуобоймой, расположенной в центре по длине стойки. В растянутой грани установлены две ламели, при этом, поперечное усиление наклеивалось поверх ламелей.

Тензодатчики были установлены на полуобойме в растянутой и в сжатой зонах и на ламелях в нижней части колонны между хомутами. Тензодатчик Т8, расположенный в растянутой зоне поперечного усиления показал нулевые деформации, датчики на полуобойме (Т10, Т11, Т13), со стороны сжатой зоны бетона, показали относительные деформации в пределах от $0{,}6\cdot10^{-3}$ до $0{,}9\cdot10^{-3}$. Максимальные деформации на растяжение в продольно расположенных ламелях показали тензодатчики Т4 и Т5, расположенные ближе к центру конструкции. Предельные относительные деформации достигли значения $2{,}9\cdot10^{-3}$. По мере отдаления от центра зоны расположения тензодатчиков в ламелях относительные деформации уменьшились до $1{,}8\cdot10^{-3}$.

Тензодатчики под номером Т6, Т7, Т9, Т16 в процессе выполнения эксперимента перестали работать по техническим причинам.

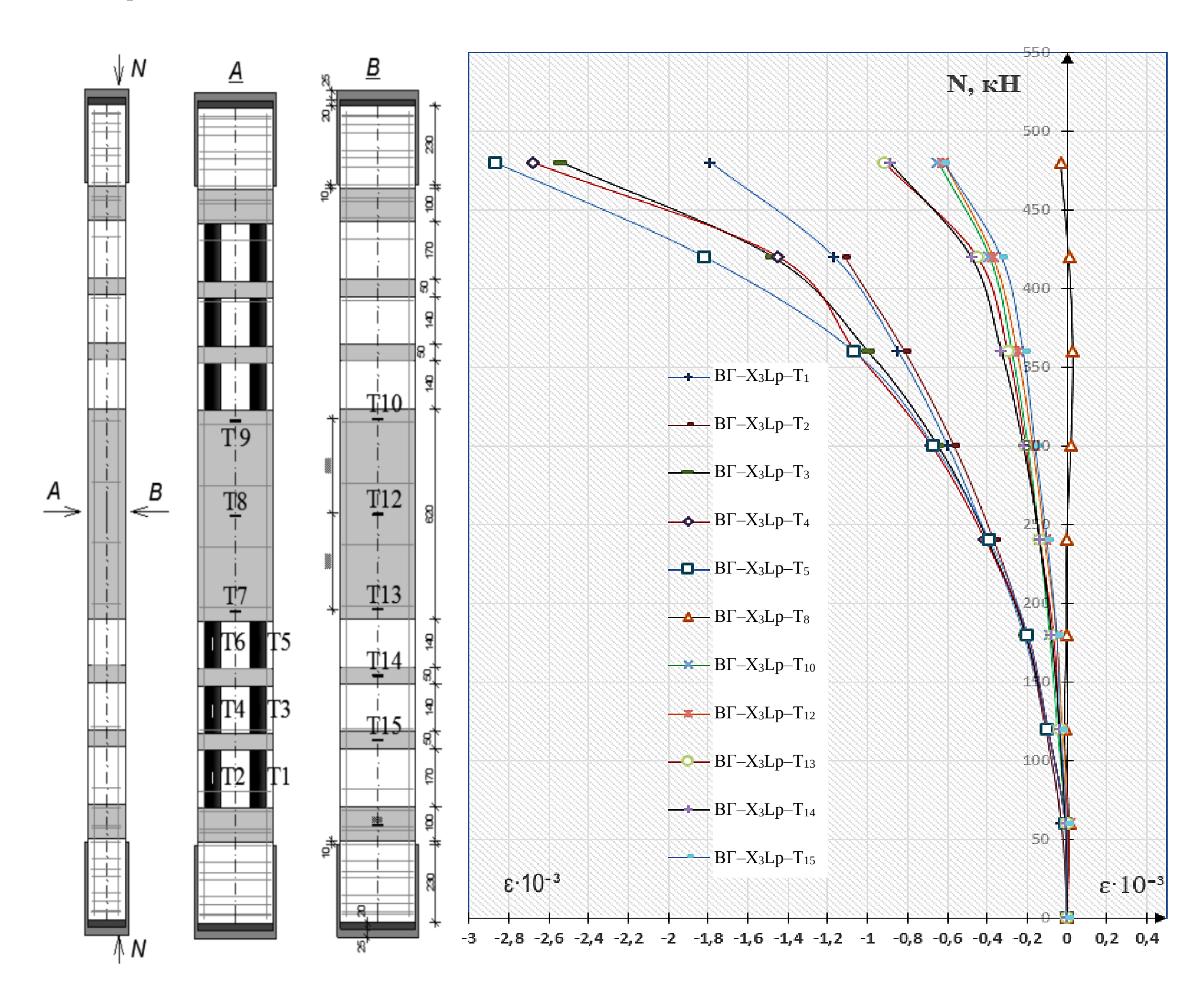


Рис. 4. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра ВГУ–$Х_3L_р$

ВГУ–X_5 — железобетонная стойка, усиленная обоймой. Тензодатчики наклеены на растянутую и сжатую грань колонны, вдоль волокон поперечного усиления. Относительные деформации композитных материалов на растянутой грани варьировались в пределах от 0 до $0{,}2\cdot10^{-3}$, на сжатой — от $0{,}35\cdot10^{-3}$ до $1{,}0\cdot10^{-3}$. Датчики Т13 и Т14 зафиксировали предельные деформации растяжения, это объясняется тем, что они были расположены в зоне наибольшего изгиба конструкции.

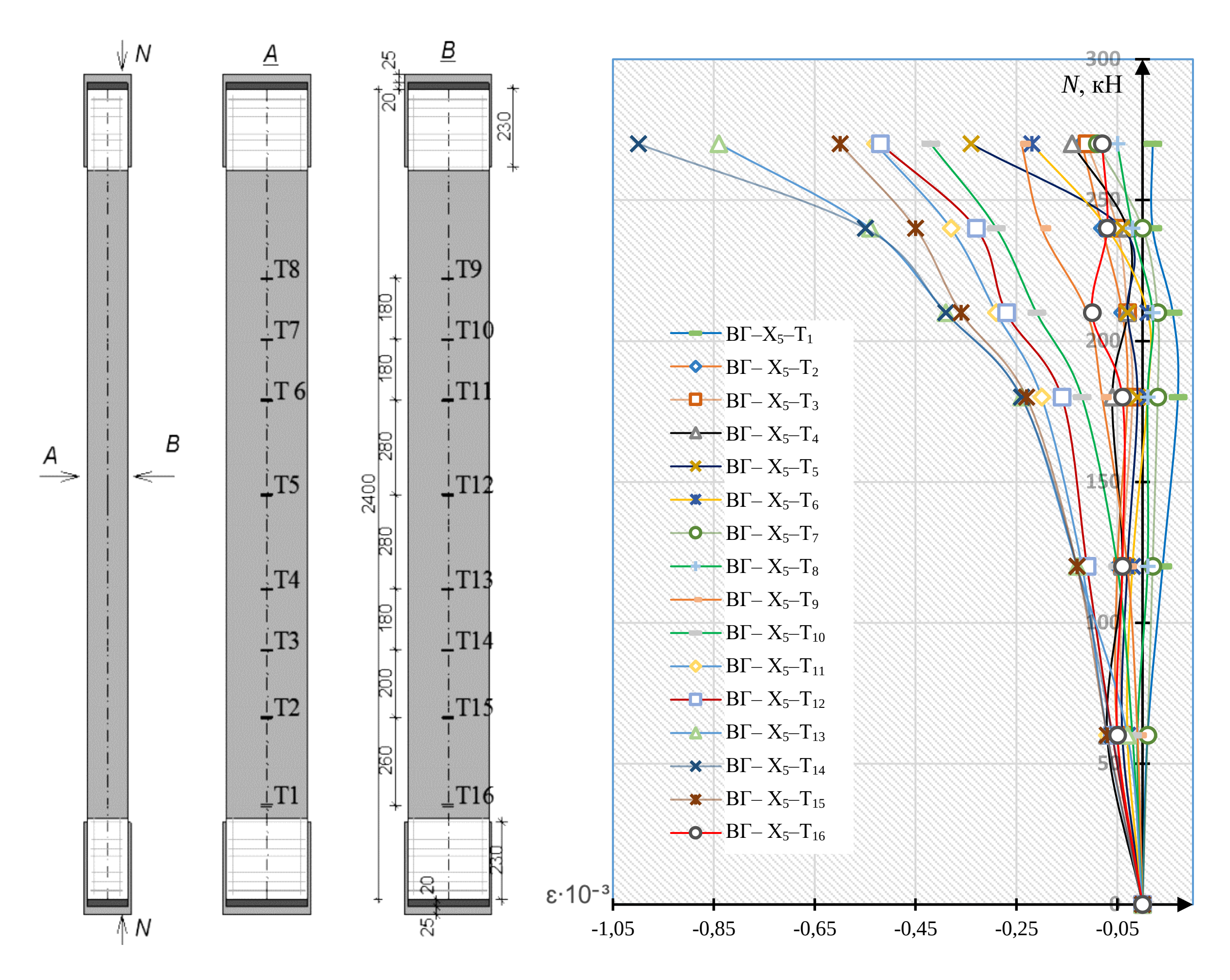


Рис. 5. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра ВГУ–X_5

Обсуждение и заключение. Анализ результатов экспериментов и определение наиболее эффективных вариантов усиления выполнялось на основе трех характеристик, а именно:

– коэффициента усиления по предельной прочности, при прямом сопоставлении результатов и при приведенной прочности бетона;

– уровня нагрузки при предельном прогибе для промышленных зданий ($e_0 = 6$ мм);

– напряжениям в композитном поперечном и продольном усилении, полученным по результатам показаний тензодатчиков.

Анализ и обработка результатов эксперимента позволили заключить следующее: при прямом сопоставлении прочности усиленных образцов по сравнению с прочностью эталонного, получили для поперечного усиления прирост прочности, не превышающей 20 %, при этом композитная обойма показала меньшую эффективность, чем прерывистое поперечное усиление. При приведенной прочности бетона усиленных образцов к эталонному эффективность усиления повысилась до 20–30 %. Однако несмотря на увеличение прочности усиленных образцов, повышение жесткости было незначительным, о чем говорят кривые на графиках прогибов (рис. 2).

Для образца, усиленного полуобоймой и продольно расположенными ламинатами, наблюдается существенный прирост прочности и жесткости. Коэффициенты усиления при прямом сопоставлении и приведенной прочности бетона показали значения $2{,}08\cdot10^{-3}$ и $1{,}84\cdot10^{-3}$ соответственно.

Эффективность усиления при предельно допустимом прогибе, равном 6 мм, для железобетонных колонн одноэтажных промышленных зданий с мостовыми кранами для образцов, усиленных поперечным армированием, коэффициенты усиления увеличились до значений $1{,}58\cdot10^{-3}$ и $1{,}35\cdot10^{-3}$. Для стойки, усиленной в продольном направлении, эффективность усиления осталась прежней.

Из приведенных выше данных следует, что композитное усиление, которое в соответствии с СП с параметрами как у опытных образцов, на самом деле считается неэффективным для увеличения прочности, существенно увеличивает несущую способность внецентренно-сжатых гибких конструкций. Наибольшую эффективность для данных характеристик опытных образцов показывает совместная работа продольного и поперечного композитного усиления. В этом случае увеличение прочности в среднем составляет в два раза.

Анализ графиков изменения относительных деформаций позволил заключить следующее:

– тензодатчики, расположенные на гранях конструкции стойки ВГУ–$Х_2$, показали очень маленькие деформации, что говорит либо о переармировании внешними композитными материалами опытного образца, либо о разрушении стойки в местах усиления. В любом случае, сделать однозначный вывод не представляется возможным, следовательно, требуется произвести дополнительные исследования для определения причины столь малого включения в работу внешнего композитного усиления. В основу данных исследований следует включить разное количество слоев композитного усиления и варьирование шага композитных хомутов;

– хомут, расположенный в середине стойки, по своей деформативности не отличается от рядом расположенных хомутов. Железобетонная стойка разрушается вне зоны расположения хомута, следовательно, можно сделать вывод, что устройство центрального хомута является неэффективным.

– тензодатчики, расположенные в композитной обойме стойки ВГУ–$Х_5$, показали деформации существенно больше, чем в предыдущем образце. При этом на начальных уровнях нагрузки разница деформаций композитных материалов растянутой и сжатой граней была несущественна. Перекос в деформациях произошел на уровнях нагрузки, превышающих 70 % от разрушающей. Относительные деформации в зоне разрушения достигали значений $0{,}85 \cdot 10^{-3} – 1 \cdot 10^{-3}$. Из показаний тензодатчиков можно сделать вывод, что композитные материалы вступают в работу, однако, небольшие деформации показывают явное внешнее переармирование;

– в образце, усиленном в продольном и поперечном направлении композитными материалами, относительные деформации развивались так же, как и в обойме, в широком композитном хомуте. Относительные деформации не превышали значения $1 \cdot 10^{-3}$. Из этого можно сделать вывод, что композитное поперечное армирование выполнено с перерасходом материалов;

– тензодатчики, расположенные в ламелях, показали примерно одинаковые симметричные деформации в двух ламелях, при этом предельные деформации достигали значений $2{,}6 \cdot 10^{-3} – 2{,}9 \cdot 10^{-3}$. Максимальные значения деформаций были в зонах ламелей, расположенных ближе к центру конструкции, что говорит о неравномерном растяжении композитных ламелей по длине колонны.

Из результатов эксперимента и проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

– усиление гибких внецентренно-сжатых железобетонных образцов не рекомендуется выполнять при помощи поперечного композитного усиления, несмотря на то, что прирост прочности образцов при предельно допустимых прогибах для конструкций достигает 35–58 %. Это связано с тем, что есть более эффективные методы усиления, основанные на использовании композитных материалов, расположенных в продольном направлении;

– при использовании комбинированного метода усиления в расчетах необходимо учитывать поперечное композитное армирование, однако количество слоев тканей или общей площади композитного материала следует уменьшить;

– композитное продольное усиление дает существенный прирост прочности и жесткости образцов. Система усиления позволяет работать совместно с бетоном конструкций вплоть до разрушения опытных образцов;

– при проектировании продольного усиления наблюдается неравномерное растяжение углепластиковых ламелей по длине конструкции, из этого следует, что целесообразно использовать неравномерное по площади поперечное сечение композитного материала продольного усилия. Этого можно добиться при помощи использования вместо ламелей углеткани с разной толщиной, достигаемой за счет количества слоев.

Список литературы

1. Корсаков Н.В. *Анализ повреждений и видов усилений сжатых железобетонных конструкций*. В: Тезисы докладов конкурса научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета. Волгоград; 2021. С. 468-469.
2. Гроздов В.Т. *Усиление строительных конструкций при реставрации зданий и сооружений*. СПб; 2005. 114 с. URL: https://dwg.ru/dnl/11364 (дата обращения 16.09.2023).
3. Онуфриев Н.М. *Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений*. Москва Стройиздат; 1965. 342 с. URL: https://dwg.ru/dnl/7364 (дата обращения 12.08.2023).
4. Семенюк-Ситников В.В. *Количественная оценка влияния устройства глубокого котлована на близлежащие здания в стесненных условиях городской застройки.* Дис. канд. техн. наук. Москва, 2005. URL:

https://www.dissercat.com/content/kolichestvennaya-otsenka-vliyaniya-ustroistva-glubokogo-kotlovana-na-blizlezhashchie-zdaniya (дата обращения 12.08.2023).

5. Мареева О.В., Кловский А.В. Оценка эффективности способов усиления железобетонных колонн при реконструкции. *Природообустройство*. 2017;(2):33–41. URL: http://elib.timacad.ru/dl/full/gmgup-05-2017-02.pdf/download/gmgup-05-2017-02.pdf (дата обращения 18.08.2023).

6. Теряник В.В., Бирюков А.Ю. Результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности сжатых усиленных элементов реконструируемых зданий. *Вестник ЮУрГУ: Строительство и архитектура.* 2009;35(168). URL: https://dspace.susu.ru/handle/0001.74/831 (дата обращения 18.09.2023).

7. Иванов Ю.В. *Реконструкция зданий и сооружений: Усиление, восстановление, ремонт*; 2012. 312 с. https://elima.ru/books/?id=928 (дата обращения 10.09.2023).

8. Залесов А.С. *Развитие методов расчета железобетонных конструкций в России.* В: Сборник научных статей к 80-летию НИИЖБ им. А.А. Гвоздева; 2007. С. 5–10.

9. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы. *Промышленное и гражданское строительство*. 2014;(7):51–54.

10. Клочкова З.Ю., Суслова А.Е. Применение железобетона и его преимущества, сравнительно с другими строительными материалами. В: *Материалы всероссийской научно-технической конференции «Комплексное изучение и освоение недр Европейского Севера России»*. Ухта; 2021. С. 110–112.

11. Аль Каради Али. Основные физико-механические свойства железобетона. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.* 2013;(5):39–42.

12. Гарибов Р.Б. *Сопротивление железобетонных несущих конструкций при агрессивных воздействиях окружающей среды.* Дис. док. техн. наук. Саратов, 2008. URL: https://www.dissercat.com/content/soprotivlenie-zhelezobetonnykh-nesushchikh-konstruktsii-pri-agressivnykh-vozdeistviyakh-okru (дата обращения 12.09.2023).

13. Доломанюк Р.Ю. Оценка состояния железобетонных конструкций для регрессивной зависимости коррозийных повреждений стальной арматуры от толщины защитного слоя бетона в условиях открытой атмосферы. В: *Сборник материалов III Национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство»*; 2020. С. 524–528.

14. Курбанов З.А., Грушевский К.Е. *Усиление сборной железобетонной колоны методом железобетонной обоймы*. В: *Сборник статей Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие: потенциал науки и современного образования»: в 3 частях*; 2018. С. 169–171.

15. Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Ремонт и усиление железобетонных конструкций в зданиях из монолитного железобетона. В: *Сборник докладов «Проектирование и строительство монолитных многоэтажных жилых и общественных зданий, мостов и тоннелей»*; 2004. С. 195–199. URL: https://interaqua.biz/stati/30-remont-i-usilenie-zhelezobetonnykh-konstruktsij-v-zdaniyakh-iz-monolitnogo-zhelezobetona (дата обращения 22.08.2023).

16. Данилов С.В., Фомичева Л.М. Усиление железобетонных колонн стальными обоймами. В: *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. материалы международной научно-технической конференции*. 2017. С. 240–241.

17. Теряник В.В. *Прочность и устойчивость внецентренно-сжатых элементов, усиленных железобетонными и металлическими обоймами*. Автореф. дис. докт. техн. наук. Челябинск; 2007. 24 с. URL: http://www.dslib.net/stroj-konstrukcii/prochnost-i-ustojchivost-vnecentrenno-szhatyh-jelementov-usilennyh-zhelezobetonnymi.html (дата обращения 22.08.2023).

18. Polskoy P., Georgiev S., Muradyan V., Shilov A. The Deformability of Short Pillars in Various Loading Options and External Composite Reinforcement. *MATEC Web of Conferences*. 2018;(196):02026. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/201819602026

19. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. О влиянии гибкости стоек на эффективность композитного усиления. *Инженерный вестник Дона*. 2015;(4). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-vliyanii-gibkosti-stoek-na-effektivnost-kompozitnogo-usileniya (дата обращения 29.08.2023).

20. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность коротких усиленных стоек при малых эксцентриситетах. *Инженерный вестник Дона*. 2014;(4). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/prochnost-i-deformativnost-korotkih-usilennyh-stoek-pri-malyh-ekstsentrisitetah (дата обращения 02.09.2023).

21. Георгиев С.В., Меретуков З.А., Соловьева А. И. Сравнение методик усиления внешним армированием композитных материалов. *Инженерный вестник Дона*. 2021;(10). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-metodik-usileniya-vneshnim-armirovaniem-kompozitnyh-materialov (дата обращения 06.09.2023).

22. Georgiev S, Mailyan D, Blyagoz A. Proposals for Determining the Relative Deformations Design Value of εb3 Concrete in Volumetric Deformation Conditions. *Materials Science Forum*. 2021;(1043):155-162. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.155

23. Mander JB, Priestly MJN, Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*. 1988;114(8):1804-1826. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)

References

1. Korsakov NV. Analysis of Deformations and Types of Reinforcements in Compressed Reinforced Concrete Structures. In: *Collection of Abstracts of the Competition of Volgograd State University Students' Scientific Papers*. Volgograd; 2021. P. 468–469. (In Russ.).

2. Grozdov VT. *Strengthening the Building Structures during Restoration of Buildings and Structures*. Saint Petersburg; 2005. 114 p. URL: https://dwg.ru/dnl/11364 (accessed: 16.09.2023). (In Russ.).

3. Onufriev NM. *Strengthening Reinforced Concrete Structures of Industrial Buildings and Structures.* Moscow: Stroiizdat; 1965. 342 p. URL: https://dwg.ru/dnl/7364 (accessed: 12.08.2023). (In Russ.).

4. Semenyuk-Sitnikov VV. *Quantitative Assessment of the Impact of a Deep Pit on Nearby Buildings in Condition of Cramped Urban Construction.* Dis. Cand. (Engineering). Moscow, 2005. URL: https://www.dissercat.com/content/kolichestvennaya-otsenka-vliyaniya-ustroistva-glubokogo-kotlovana-na-blizlezhashchie-zdaniya (accessed: 12.08.2023). (In Russ.).

5. Mareeva OV, Klovskii AV. Assessment of the Efficiency of Strengthening of Reinforced Concrete Columns during Reconstruction. *Prirodoobustrojstvo*. 2017;(2):33–41. URL: http://elib.timacad.ru/dl/full/gmgup-05-2017-02.pdf/download/gmgup-05-2017-02.pdf (accessed: 18.08.2023). (In Russ.).

6. Teryanik VV, Biryukov AYu. Results of Experimental Investigations of the Strength and Deformability of Reinforced Compression Elements of Reconstructed Buildings. *Bulletin of the South Ural state University: Series "Construction Engineering and Architecture"*. 2009;35(168). URL: https://dspace.susu.ru/handle/0001.74/831 (accessed: 18.09.2023). (In Russ.).

7. Ivanov YuV. *Reconstruction of Buildings and Structures: Strengthening, Restoration, Repair*; 2012. 312 p. https://elima.ru/books/?id=928 (accessed: 10.09.2023). (In Russ.).

8. Zalesov AS. Development of Methods for Calculating Reinforced Concrete Structures in Russia. In*: Collection of Scientific Articles in Honour of 80th Anniversary of the Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named A.A. Gvozdev*; 2007. P. 5–10. (In Russ.).

9. Tamrazyan AG. Concrete and Reinforced Concrete: Problems and Prospects. *Civil Engineering*. 2014;(7):51–54. (In Russ.).

10. Klochkova ZYu, Suslova AE. Application of Reinforced Concrete and Its Advantages Compared to Other Building Materials. In: *Proceedings of the All-Russian Science and Engineering Conference "Comprehensive Study and Development of the Subsoil of the European North of Russia*. Ukhta; 2021. P. 110–112. (In Russ.).

11. Al' Karadi A. Basic Physical and Mechanical Properties of Reinforced Concrete. Bulletin of Belgorod State Technological University named after V G Shukhov. 2013;(5):39–42. (In Russ.).

12. Garibov RB. *Resistance of Reinforced Concrete Load-Bearing Structures under Aggressive Environmental Influences*. Dis. Dr.Sci.(Engineering). Saratov, 2008. URL: https://www.dissercat.com/content/soprotivlenie-zhelezobetonnykh-nesushchikh-konstruktsii-pri-agressivnykh-vozdeistviyakh-okru (accessed: 12.09.2023). (In Russ.).

13. Dolomanyuk RYu. Condition Assessment of Reinforced Concrete Structures for a Regression Based on the Corrosive Damage of Steel Reinforcement from the Thickness of the Protective Concrete Layer in the Open Atmosphere. In: *Proceedings of the III National Science and practical Conference "Education, Transport, Innovations. Construction"*; 2020. P. 524–528. (In Russ.).

14. Kurbanov ZA, Grushevskii KE. Strengthening of Precast Reinforced Concrete Columns by the Method of Concrete Collars. In: *Proceedings of the International Science and Practical Conference "Innovative Development: the Potential of Science and Modern Education": in 3 parts*; 2018. P. 169–171. (In Russ.).

15. Khayutin YuG, Chernyavskii VL, Aksel'rod EZ. Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Structures in Buildings Made of Monolithic Reinforced Concrete. In: *Collection of Papers "Design and Construction of Monolithic Multi-Storey Residential and Public Buildings, Bridges and Tunnels"*; 2004. P. 195–199. URL: https://in-teraqua.biz/stati/30-remont-i-usilenie-zhelezobetonnykh-konstruktsij-v-zdaniyakh-iz-monolitnogo-zhelezobetona (accessed: 22.08.2023). (In Russ.).

16. Danilov SV, Fomicheva LM. Strengthening the Reinforced Concrete Columns with Steel Cages. In: *Proceedings of the International Science and Engineering Conference "Materials, Equipment and Resource Saving Technologies"*. 2017. P. 240–241. (In Russ.).

17. Teryanik VV. *Strength and Stability of Eccentrically Compressed Elements Reinforced With Reinforced Concrete and Metal Cages.* Extended Abstract of Cand.Sci.(Engineering) Dissertation. Chelyabinsk; 2007. 24 p. URL: http://www.dslib.net/stroj-konstrukcii/prochnost-i-ustojchivost-vnecentrenno-szhatyh-jelementov-usilennyh-zhelezobet-onnymi.html (accessed 22.08.2023). (In Russ.).

18. Polskoy P, Georgiev S, Muradyan V, Shilov A. The Deformability of Short Pillars in Various Loading Options and External Composite Reinforcement. *MATEC Web of Conferences*. 2018;(196):02026. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/201819602026

19. Polskoy PP, Mailyan DR, Georgiev SV. About the Effect of Poles' Flexibility on the Efficiency of Composite Reinforcement. *Engineering Journal of Don*. 2015;(4). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-vliyanii-gibkosti-stoek-na-effektivnost-kompozitnogo-usileniya (accessed: 29.08.2023). (In Russ.).

20. Polskoy PP, Mailyan DR, Georgiev SV. Strength and Deformability of Short Reinforced Poles at Small Eccentricities. *Engineering Journal of Don*. 2014;(4). URL: https://cyberleninka.ru/arti-cle/n/prochnost-i-deformativnost-korotkih-usilennyh-stoek-pri-malyh-ekstsentrisitetah (accessed: 02.09.2023). (In Russ.).

21. Georgiev SV, Meretukov ZA, Solov'eva AI. Comparison of Methods for Strengthening with External Reinforcement of Composite Materials. *Engineering Journal of Don*. 2021;(10). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-metodik-usileniya-vneshnim-armirovaniem-kompozitnyh-materialov (accessed: 06.09.2023). (In Russ.).

22. Georgiev S, Mailyan D, Blyagoz A. Proposals for Determining the Relative Deformations Design Value of εb3 Concrete in Volumetric Deformation Conditions. *Materials Science Forum*. 2021;(1043):155-162. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.155

23. Mander JB, Priestly MJN, Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering.* 1988;114(8):1804-1826. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)

Поступила в редакцию 22.09.2023
Поступила после рецензирования 03.10.2023
Принята к публикации 16.10.2023

Об авторах:

Георгиев Сергей Валерьевич, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, sergey.georgiev@bk.ru

Маилян Дмитрий Рафаэлович, профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, dmailyan868@mail.ru

Соловьева Анастасия Ивановна, инженер и ассистент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ассистент, ORCID, 98rosignol@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Георгиев С.В. — анализ результатов исследований, проведение расчетов, формирование выводов.

Маилян Д.Р. — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, корректировка выводов.

Соловьева А.И. — выполнение расчетов, подготовка текста.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 22.09.2023
Revised 03.10.2023
Accepted 16.10.2023

About the Authors:

Sergey V. Georgiev, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, sergey.georgiev@bk.ru

Dmitry R. Mailyan, Dr.Sci. (Engineering), Professor of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Professor, ORCID, dmailyan868@mail.ru

Anastasia I. Solovyova, Engineer and Assistant at the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, 98rosignol@mail.ru

Claimed contributorship:

Georgiev SV — analysis of the research results, calculations, formulating the conclusions.

Mailyan DR — formulating the main concept, aim and objectives of the research, scientific supervision, correcting the conclusions.

Solovyova AI — calculations, text preparation.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ




Научная статья

УДК 624.012.04-52

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-19-26

Влияние длительного воздействия нагрузок на прочность и жесткость стоек кольцевого сечения

В.Л. Щуцкий, Е.А. Ефименко ✉

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ ovekaterina90@yandex.ru

Аннотация

Введение. Современные методы анализа и численных экспериментов в области расчета и проектирования строительных конструкций в большинстве своем направлены на более глубокое изучение изменения показателей тех или иных конструкций под воздействием определенных нагрузок. Нормативные документы, разработанные ранее при изучении определенных режимов работы конструкций, со временем и при получении новых результатов численных исследований и анализа, требуют доработок и актуализации. Именно с целью, приведенной выше, были выполнены численные исследования, описанные в данной статье.

Материалы и методы. Нужно сказать, что большая часть проведенных ранее исследований базировались на результатах воздействия на конструкции кратковременных нагрузок, но при этом исследованию влияния длительных нагрузок на работу конструкций уделено недостаточное внимание. В данной статье приведены результаты численного эксперимента по изучению несущей способности, жесткости на изгиб, максимальной силы для опор линий электропередач при кратковременном и длительном действии нагрузок. В качестве исследуемого образца взята цилиндрическая опора линии электропередач по ГОСТ 22687.2 «Стойки цилиндрические железобетонные центрифугированные для опор высоковольтных линий электропередачи».

Результаты исследования. В данной работе приведены результаты исследования поведения цилиндрических железобетонных стоек, служащих опорами линий электропередач, при воздействии кратковременных и длительных загружений. В статье приведены результаты численных экспериментов по исследованию показателей прочности и жесткости вышеуказанных конструкций при различных видах нагружений, а также при изменении эксцентриситетов приложения этих нагрузок. Выполнена оценка изменения показателей жесткости стоек при длительном действии на них нагрузок.

Обсуждение и заключения. На основе собранных результатов численного эксперимента выполнен анализ показателей прочности и жесткости стоек кольцевого сечения для линий электропередач, а также внесены предложения по совершенствованию норм расчетов, и получен задел для дальнейшего исследования данного вопроса.

Ключевые слова: бетон, железобетон, прочность, жесткость, арматура, прогиб, эксцентриситет, стойки, кольцевое сечение

Для цитирования. Щуцкий В.Л., Ефименко Е.А. Влияние длительного воздействия нагрузок на прочность и жесткость стоек кольцевого сечения. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):19–26. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-19-26

Original article

Influence of the Long-Term Loading on the Strength and Rigidity of the Annular Section Poles

Viktor L. Shchutskiy , **Ekaterina A. Efimenko**  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ ovekaterina90@yandex.ru

Abstract

Introduction. The modern methods of analysis and conducting the numerical experiments referring to calculation and design of constructions are mostly aimed at a deeper study of parameter changes of different structures exposed to the influence of the certain loads. Due to the course of time and upon obtaining and analysing the new results of the numerical studies, there arises the need to revise and update the normative documents developed in the past in the frame of studying the certain modes of structures' operation. Bearing in mind the above-mentioned objective, the numerical study presented in this article has been carried out.

***Materials and Methods*.** It should be mentioned, that most of the previously conducted research was based on the results of the short-term exposure of the structures to the loads, but not enough attention was paid to the study of the influence of the long-term loading on the structures' operation. This paper presents the results of the numerical experiments investigating the load-bearing capacity, flexural rigidity and maximum force of the power transmission line poles exposed to the short-term and long-term loads. The specimen under study is the cylindrical power transmission line pole complying with the GOST 22687.2 "Centrifugal cylinder reinforced concrete posts for high-voltage transmission lines".

Results. The paper presents the results of studying the behaviour of the cylindrical reinforced concrete poles, serving as the supports for the electrical power transmission lines, under the short-term and long-term loading. The work provides the results of numerical experiments investigating the strength and rigidity parameters of the above-mentioned structures under different types of loading, as well as upon changing the eccentricities of the application of these loads. The assessment of the rigidity parameters change under the long-term exposure of the poles to the loads is carried out.

Discussion and Conclusion. Based on the results, obtained during the numerical experiments, the strength and rigidity parameters of the annular section power transmission line poles were analysed, and proposals for improving the design codes were made that could become a basis for the further research on this issue.

Keywords: concrete, reinforced concrete, strength, rigidity, reinforcement, deflection, eccentricity, poles, annular section

For citation. Shchutskiy VL, Efimenko EA. Influence of the Long-Term Loading on the Strength and Rigidity of the Annular Section Poles. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):19–26. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-19-26

Введение. Очень многие работы популярных ученых в разное время были посвящены исследованию свойств центрифугированного железобетона. Среди авторов, внесших наибольший вклад в данные исследования, можно прежде всего выделить И.Н. Ахвердова [1], В.М. Баташева [2,3], С.А. Дмитриева [4], А.П. Кудзиса [5, 6], В.Н. Лебедева, Т.Ф. Нагорную [3]. В исследованиях перечисленных авторов и многих других их коллег наибольшее внимание уделено именно расчетам вышеуказанных конструкций при кратковременном воздействии нагрузки. Вышеуказанные исследования легли в основу норм СНиП 2.03.01-84 «Бетонные и железобетонные конструкции» для расчета конструкций кольцевого сечения из железобетонов. Что касается новых норм СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции», то ранее предложенный метод расчета конструкций в них в существенной степени не изменился, хотя и появились некоторые особенности расчета, что подробно описано в [7].

Основной целью данного научного исследования является изучение прочностных показателей, а также показателей жесткости железобетонных стоек линий электропередач цилиндрического поперечного сечения при воздействии на них длительно действующих нагрузок.

Для осуществления поставленной цели научного исследования были решены следующие задачи:

– изучено изменение жесткости железобетонных цилиндрических стоек при постепенном увеличении эксцентриситета приложения нагрузки.

– изучено поведение железобетонных цилиндрических стоек при длительном действии нагрузки, а также изменение жесткости данных конструкций при указанных ранее нагружениях.

– построены в виде графиков пропорциональные зависимости, наглядно показывающие изменения критической силы цилиндрических стоек при длительных нагружениях с учетом изменения влажности окружающей среды и связанного с этим изменения модуля деформации конструкций.

– подробно изучено изменение несущей способности исследуемых элементов с увеличением отношения продольной силы к критической продольной силе.

Материалы и методы. В данной статье, являющейся продолжением ранее выполненных изысканий [7–9], приведены результаты численного эксперимента по изучению несущей способности, жесткости на изгиб, максимальной силы для опор линий электропередач при кратковременном и длительном действии нагрузок. Как исследуемый образец взята цилиндрическая опора линии электропередач по ГОСТ 22687.2.

Все начальные параметры исследуемого объекта описаны ниже.

Параметры исследуемой опоры линий электропередач:

1. Тип опоры по ГОСТ 22687. 2 — СЦ20.2-1.0.
2. Внешний диаметры стойки — 800 мм.
3. Внутренний диаметры стойки — 640 мм.
4. Толщина стенки — 80 мм.
5. Класс и количество напрягаемой арматуры — 22d14 А600.
6. Класс и количество ненапрягаемой арматуры — 30d14 А600.
7. Уровень преднапряжения арматуры — 0,8 $R_{sp,n}$.

Анализ напряженного состояния конструкции при кратковременном и длительном загружениях проводился по нормам СП 63.13330.2018.

Относительная высота сжатой зоны бетона ξ_{cir} элементов кольцевого сечения:

$$\xi_{cir} = \frac{N + R_s A_{s,tot}}{R_b A_b + (R_{sc} + 1{,}7 R_s) A_{s,tot}}, \tag{1}$$

где $A_{s,tot} = A_{sp} + A_s$; A_{sp}, A_s — площади напрягаемой и ненапрягаемой арматуры.

Несущая способность кольцевого сечения M_{ult}:

$$M_{ult} \le \left(R_b A_b r_m + R_{sc} A_{s,tot} r_s\right) \frac{\sin(\pi \xi_{cir})}{\pi} + R_s A_{s,tot} (1 - 1{,}7 \xi_{cir}) z_s \tag{2}$$

Жесткость на изгиб опоры линий электропередач D и критическая сила N_{crc} определяются по формулам (3) и (4):

$$D = D_b + D_s = \frac{0{,}15\, E_b\, I_b}{\varphi_l (0{,}3 + \delta_e)} + 0{,}7 E_s I_s, \tag{3}$$

где D_b — жесткость сечения (бетонного); D_s — жесткость арматуры; I_b и I_s — моменты инерции материалов; $\delta_e = \frac{e_0}{H}$ — относительный эксцентриситет внешней продольной силы N; H — внешний диаметр стойки; $\varphi_l = 1$ при кратковременном действии нагрузки.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}. \tag{4}$$

Учет влияния длительного воздействия нагрузок на изгибную жесткость и критическую силу осуществлялся изменением коэффициента φ_l и модуля деформации бетона $E_{b,\tau}$ по формулам (5) и (6):

$$\varphi_l = 1 + \beta \frac{M_l}{M} \tag{5}$$

$$E_{b,\tau} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}} \tag{6}$$

В ходе численного эксперимента для увеличения количества возможных нагружений стойки исследовалось изменение жесткости D и критической силы N_{cr} при кратковременном и длительном загружении в зависимости от относительного эксцентриситета δ_e = 0,15 – 1,35 (кратно 0,15). А при оценке несущей способности стойки M_{ult} в зависимости от относительной высоты сжатой зоны ξ_{cir} значение N принималось кратным N_{cr} от 0,2 до 1.

В таблице 1 приведены численные значения жесткости D_b бетонного сечения стойки, а в таблице 2 — жесткость D железобетонного сечения при кратковременном и длительном загружении для различных значений φ_l и условий эксплуатаций.

Таблица 1

Жесткость D_b бетонного сечения стойки, 10–11·Н·мм^2

δ_e	0,15	0,45	0,75	1,05	1,35
φ_l=1,0 (кратковременное загружение)					
E_b (начальный)	1525,29	915,17	653,70	508,43	415,99
φ_l=1,2 (длительное загружение)					
E_b (начальный)	1271,07	762,64	544,75	423,69	346,66
$E_{b,\tau}$ ($W > 75$ %)	552,64	331,58	236,85	184,21	150,72
$E_{b,\tau}$ ($W = 40 – 75$ %)	453,95	272,37	194,55	151,32	123,81
$E_{b,\tau}$ ($W < 40$ %)	353,08	211,85	151,32	117,69	96,29
φ_l=1,4 (длительное загружение)					
E_b (начальный)	1089,49	653,70	466,93	363,16	297,13
$E_{b,\tau}$ ($W > 75$ %)	473,69	284,22	203,01	157,90	129,19
$E_{b,\tau}$ ($W = 40 – 75$ %)	389,10	233,46	166,76	129,70	106,12
$E_{b,\tau}$ ($W < 40$ %)	302,64	181,58	129,70	100,88	82,54
φ_l=1,6 (длительное загружение)					
E_b (начальный)	953,31	571,98	408,56	317,77	259,99
$E_{b,\tau}$ ($W > 75$ %)	414,48	248,69	177,63	138,16	113,04
$E_{b,\tau}$ ($W = 40 – 75$ %)	340,47	204,28	145,91	113,49	92,85
$E_{b,\tau}$ ($W < 40$ %)	264,81	158,88	113,49	88,27	72,22
φ_l=1,8 (длительное загружение)					
E_b (начальный)	847,38	508,43	363,16	282,46	231,10
$E_{b,\tau}$ ($W > 75$ %)	368,43	221,06	157,90	122,81	100,48
$E_{b,\tau}$ ($W = 40 – 75$ %)	302,64	181,58	129,70	100,88	82,54
$E_{b,\tau}$ ($W < 40$ %)	235,38	141,23	100,88	78,46	64,20

Таблица 2

Жесткость D железобетонного сечения стойки, 10–11 Н·мм^2

δ_e	0,15	0,45	0,75	1,05	1,35
φ_l=1,0 (кратковременное загружение)					
E_b (начальный)	2332,06	1721,95	1460,47	1315,20	1222,76
φ_l=1,2 (длительное загружение)					
E_b (начальный)	2077,85	1569,42	1351,52	1230,47	1153,43
$E_{b,\tau}$ ($W > 75$ %)	1359,42	1138,36	1043,62	990,99	957,49
$E_{b,\tau}$ ($W = 40 – 75$ %)	1260,73	1079,15	1001,33	958,09	930,58
$E_{b,\tau}$ ($W < 40$ %)	1159,85	1018,62	958,09	924,47	903,07
φ_l=1,4 (длительное загружение)					
E_b (начальный)	1896,27	1460,47	1273,70	1169,94	1103,91
$E_{b,\tau}$ ($W > 75$ %)	1280,47	1090,99	1009,79	964,67	935,96
$E_{b,\tau}$ ($W = 40 – 75$ %)	1195,88	1040,24	973,53	936,48	912,89
$E_{b,\tau}$ ($W < 40$ %)	1109,41	988,36	936,48	907,65	889,31
φ_l=1,6 (длительное загружение)					
E_b (начальный)	1760,08	1378,76	1215,33	1124,54	1066,77
$E_{b,\tau}$ ($W > 75$ %)	1221,25	1055,46	984,41	944,93	919,81
$E_{b,\tau}$ ($W = 40 – 75$ %)	1147,24	1011,05	952,69	920,26	899,63
$E_{b,\tau}$ ($W < 40$ %)	1071,58	965,66	920,26	895,04	878,99
φ_l=1,8 (длительное загружение)					
E_b (начальный)	1654,16	1315,20	1169,94	1089,24	1037,88
$E_{b,\tau}$ ($W > 75$ %)	1175,20	1027,83	964,67	929,58	907,25
$E_{b,\tau}$ ($W = 40 – 75$ %)	1109,41	988,36	936,48	907,65	889,31
$E_{b,\tau}$ ($W < 40$ %)	1042,16	948,00	907,65	885,24	870,97

Важно отметить, что жесткость бетонного сечения стойки D_b по формуле (3) изменяется пропорционально E_b и обратно пропорционально коэффициенту длительности действия нагрузки φ_l. Поэтому в таблицах 1 и 2 и на графиках (рис. 1) значения D_b приведены при различных φ_l для начального модуля упругости: E_b (кратковременное действие нагрузки) и $E_{b,\tau}$ (длительное действие нагрузки) при трех значениях условий эксплуатации.

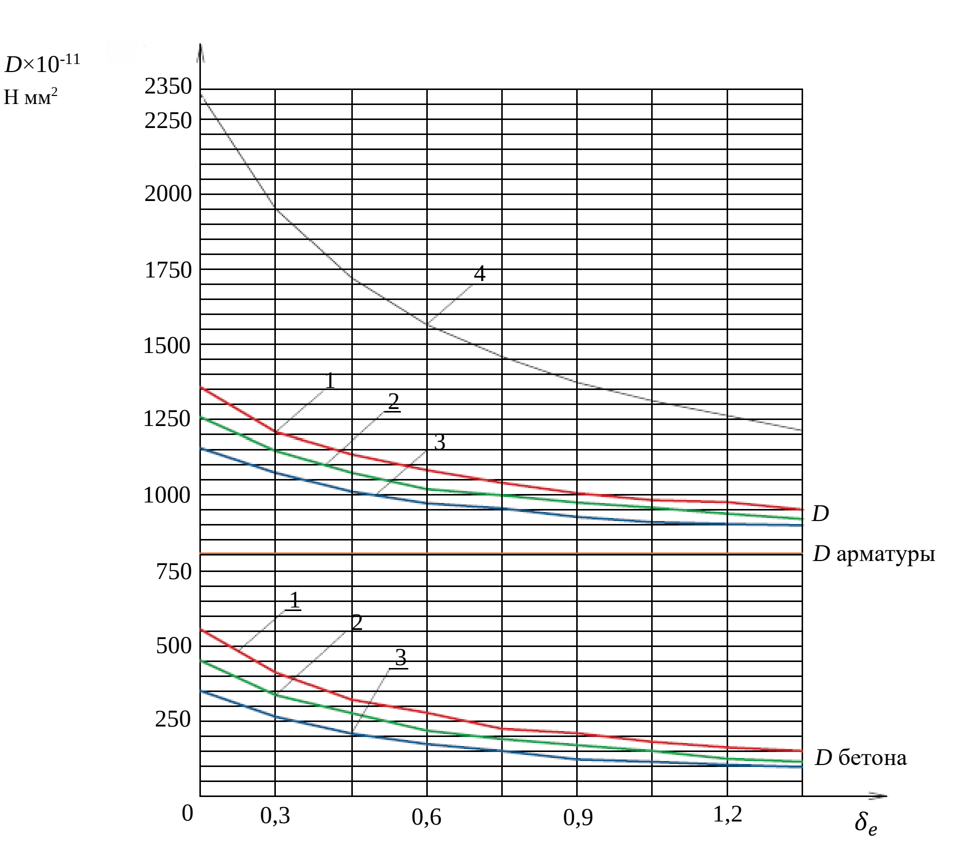


Рис. 1. Изменение жесткости D_b — бетонного сечения и D — железобетонного сечения от относительного эксцентриситета (при $\varphi_l = 1{,}2$): 1 — при $W > 75\%$; 2 — при $W = 40 – 75$ %; 3 — при $W < 40\%$; 4 — при кратковременном загружении

Анализ этих графиков (рис. 1) показывает, что на жесткость стойки D_b (при прочих равных условиях) основное влияние оказывает относительный эксцентриситет приложения нагрузки δ_e. При этом функциональная зависимость $D_b = f(\delta_e)$ и $D = f(\delta_e)$ носит нелинейный характер, что очевидно из формулы (3).

Условия эксплуатации W — влажность окружающей среды и связанные с ней значения $E_{b,\tau}$ оказывают меньшее влияние на жесткости D_b и D, при этом вид функции $D_b = f(\delta_e)$ и $D = f(\delta_e)$ остается неизменным, а графики сближаются с увеличением δ_e.

Так, например, жесткость D_b (при $\varphi_l = 1{,}2$ и W = более 75 %) изменилась от $552{,}64 \times 10^8$ кН·мм^2 (при $\delta_e = 0{,}15$) до $150{,}72 \times 10^8$ кН·мм^2 (при $\delta_e = 1{,}35$), то есть уменьшилась в 3,66 раза. При этом для любого значения δ_e изменение влажности $W = 40 \div 75$ %, приводит к снижению жесткости D_b в 1,565 раза. Эта закономерность справедлива для каждой строки и каждого столбца значений D_b (таблица 1).

Возможное влияние относительного эксцентриситета δ_e на полную жесткость D (таблица 2) сказывается в несколько раз меньше, чем на D_b, что объясняется весовой долей жесткости арматуры D_s в общей жесткости сечения стойки.

Так, например, жесткость D (при $\varphi_l = 1{,}2$ и W = более 75 %) изменилась от $1359{,}42 \times 10^8$ кН·мм^2 (при $\delta_e = 0{,}15$) до $957{,}49 \times 10^8$ кН мм^2 (при $\delta_e = 1{,}35$), то есть уменьшилась в 1,42 раза. При этом изменение влажности среды W при длительном воздействии нагрузки на полную жесткость D значительно меньше, чем на D_b. Например, изменение $W = 40 – 75$ % ($\varphi_l = 1{,}2, \delta_e = 0{,}15$) приводит к снижению жесткости с $1359{,}42 \times 10^8$ кН·мм^2 до $1159{,}85 \times 10^8$ кН·мм^2, т. е. на 17 %.

На рис. 2 подробно рассмотрены графики изменения N_{cr} от относительного эксцентриситета $\delta_e = f(\delta_e)$. Анализ данных зависимостей показывает, что основное влияние на критическую силу стойки N_{cr} оказывает относительный эксцентриситет приложения нагрузки δ_e. При этом влияние коэффициента длительности нагрузки φ_l на критическую силу стойки N_{cr} непропорционально изменению величины φ_l. Это объясняется отсутствием явного влияния коэффициента φ_l на жесткость D_s.

Выполненные в неполном объеме исследования несущей способности стоек M_{ult} показали, что основное влияние на несущую способность оказывает величина относительной сжатой зоны бетона ξ_{cir} и отношения $\frac{N}{N_{crc}}$. При этом M_{ult} возрастает с увеличением $\frac{N}{N_{crc}}$, достигая максимального значения при определенной величине $\frac{N}{N_{crc}}$ (рис. 3).

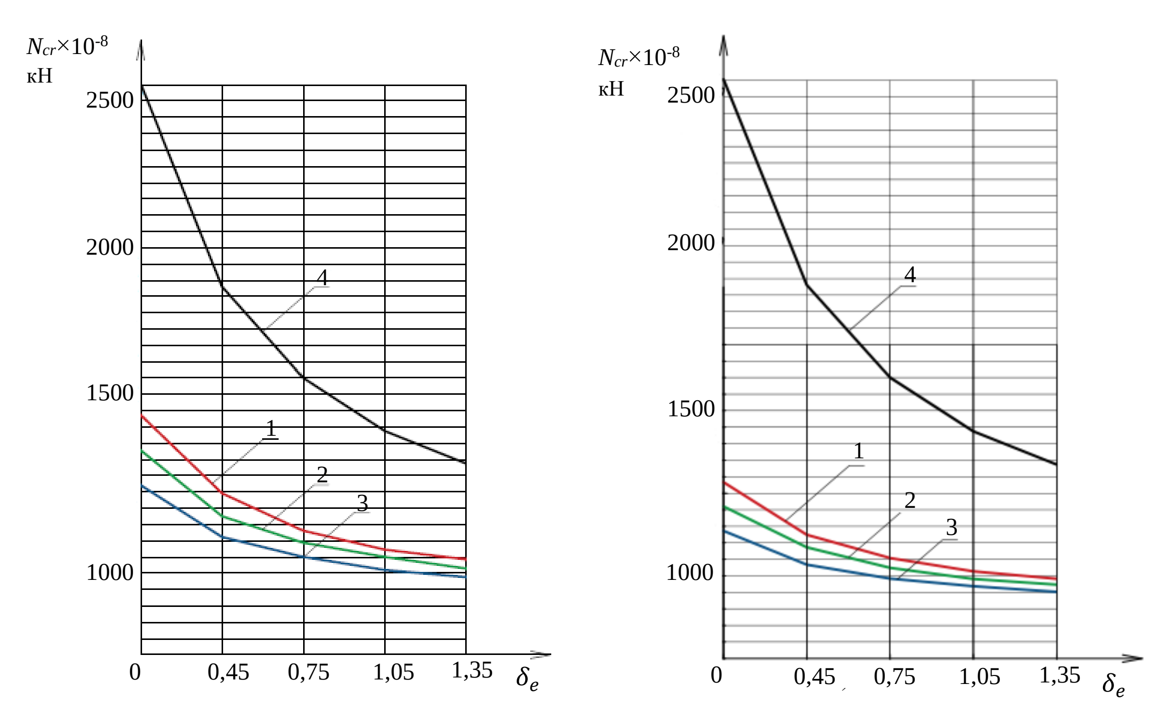


Рис. 2. Изменение критической силы N_{cr} от относительного эксцентриситета:
а — при $\varphi_l = 1{,}2$; *б* — при $\varphi_l = 1{,}8$;
1 — при *W* > 75 %; 2 — при *W* = 40–75 %; 3 — при *W* < 40 %; 4 — при кратковременном загружении

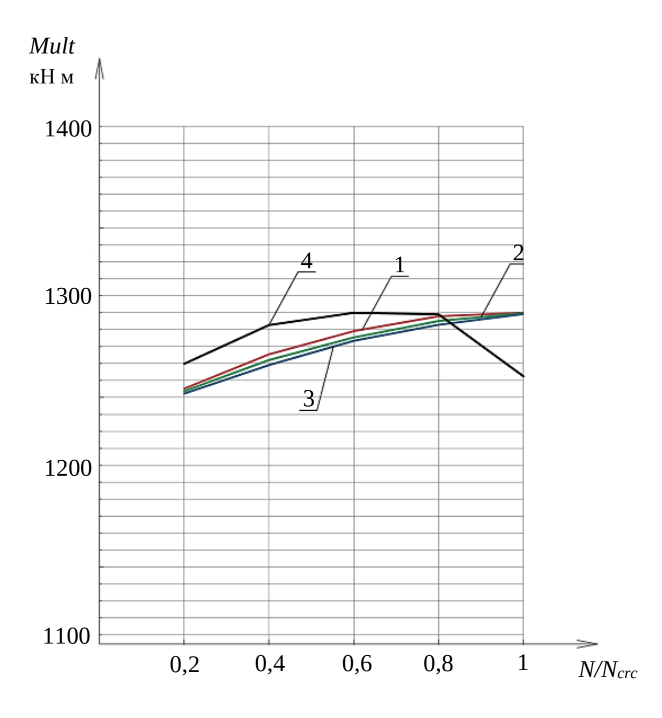


Рис. 3. Изменение несущей способности M_{ult} в зависимости от отношения $\frac{N}{N_{crc}}$:
1 — при *W* > 75 %; 2 — при *W* = 40 – 75 %; 3 — при *W* < 40 %; 4 — при кратковременном загружении

Следует отметить, что при кратковременном действии нагрузки несущая способность M_{ult} резко снижается при $\frac{N}{N_{crc}}$, примерно равном 0,8. Однако при длительном действии нагрузки наблюдается плавное увеличение M_{ult} вплоть до $\frac{N}{N_{crc}}$, равного 1.

Результаты исследования.

1. Показатель жесткости опор линий электропередач с поперечным сечением кольцевой формы *D* снижается при кратковременных и длительных нагружениях при увеличивающемся эксцентриситете приложения δ_e. График функции $D = f(\delta_e)$ при этом имеет нелинейный вид.

2. Длительные по времени нагружения железобетонных опор линий электропередач ведут к снижению жесткости ранее указанных конструкций D_b, при этом данное снижение жесткости имеет прямо пропорциональную зависимость от φ_l и обратно пропорциональную зависимость от $E_{b,\tau}$ (рис. 1). Для разных сочетаний φ_l и δ_e изменение влажности воздуха *W* от 75 % до 40 % приводит к уменьшению жесткости D_b в 1,565 раза.

3. Воздействие таких факторов, как φ_l и $E_{b,\tau}$, на полную жесткость сечения опоры линий электропередач *D* гораздо меньше, чем на жесткость сечения из бетона D_b (таблица 2).

4. Критическая продольная сила опор линий электропередач с поперечным сечением в форме кольца N_{cr} уменьшается при увеличении эксцентриситета δ_e как при кратковременном, так и при длительном действии нагрузки. Функциональная зависимость $N_{crc} = f(\delta_e)$ носит нелинейный характер (рис. 2). С увеличением φ_l наблюдается снижение критической силы N_{cr} непропорционально значению φ_l.

5. Предварительное исследование несущей способности стойки M_{ult} (2) выявило, что M_{ult} возрастает с увеличением отношения $\frac{N}{N_{cr}}$, достигая максимума в пределах допустимых значений $\frac{N}{N_{cr}} = 0,1 \div 1$ (рис. 3).

Обсуждение и заключение. Проведение численного эксперимента, изложенного в данной статье, позволило авторам сделать наиболее подробные выводы о работе железобетонных стоек кольцевого сечения. Так, например, установлена зависимость снижения показателя жесткости исследуемых конструкций при увеличении эксцентриситетов приложения нагрузок. Также выявлено снижение критической продольной силы в стойках при увеличении эксцентриситета δ_e как при длительных, так и при кратковременных загружениях. Помимо прочего, авторами был выполнен анализ жесткости стоек кольцевого сечения из железобетона, а также внесены предложения по совершенствованию норм расчетов данных конструкций.

Список литературы

1. Ахвердов И.Н. *Железобетонные напорные центрифугированные трубы*. Москва: Стройиздат; 1967. 164 с.

2. Баташев В.М. *Прочность, трещиностойкость и деформации железобетонных элементов с многорядным армированием.* Киев: Будівельник; 1978. 121 с.

3. Баташев В.М., Андросов С.Т., Лебедев В.Н., Нагорная Т.Ф. Расчет прочности изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов кольцевого и круглого сечения. *Бетон и железобетон.* 1971;5:31–34.

4. Дмитриев С.А., Батащев В.М. Деформации (прогибы) железобетонных элементов кольцевого сечения и раскрытие трещин в них. В: *Сборник трудов НИИЖБ «Особенности деформаций бетона и железобетона и использование ЭВМ для оценки их влияния на поведение конструкций».* Москва: Стройиздат; 1969. С. 157–189.

5. Кудзис А.П. О расчете по прочности внецентренно сжатых элементов кольцевого сечения при малых эксцентриситетах. В: *Труды КПИ «Исследования по железобетонным конструкциям».* Вильнюс: Минтис; 1969. С. 29–35.

6. Кудзис А.П. *Железобетонные конструкции кольцевого сечения.* Вильнюс: Минтис; 1975. 224 с.

7. Shchutskiy V.L., Nasevich A.S., Chubarov V.E., Blyagoz A.M. The Research on Bearing Capacity of Supports with Annular Section. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019;698(2):022089. https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/2/022089

8. Nasevich A.S., Shchutskiy V.L., Stelmakh S.A., Antipov O.V. Crack Strength and Deformability of Power Transmission Line Conical Poles. *Materials Science Forum.* 2018;931:304–310. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.304

9. Дедух Д.А., Щуцкий В.Л., Кузьменко А.А. Свойства центрифугированного бетона опор линий электропередач. *Инженерно-строительный журнал.* 2017;7(75):37–51. https://doi.org/10.18720/MCE.75.4

References

1. Akhverdov IN. *Reinforced Concrete Pressure Centrifuged Pipes*. Moscow: Stroyizdat; 1967. 164 p. (In Russ.).

2. Batashev VM. *Strength, Crack Resistance and Deformations of Reinforced Concrete Elements with Multi-Row Reinforcement*. Kiev: Budivelnik; 1978. 121 p. (In Russ.).

3. Batashev VM, Androsov ST, Lebedev VN, Nagornaya TF. Strength Calculation of Bending and Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Elements of Annular and Circular Section. *Concrete and Reinforced Concrete.* 1971;5:31–34. (In Russ.).

4. Dmitriev SA, Bataschev VM. Deformations (Deflections) of Reinforced Concrete Elements of Annular Cross-section and Crack Opening in Them. In: *Proceedings of the Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete "Features of Concrete and Reinforced Concrete Deformations and the Use of Computers to Assess Their Influence on the Behavior of Structures"*. Moscow: Stroyizdat; 1969. P. 157–189. (In Russ.).

5. Kudzis AP. About Strength Calculation of Eccentrically Compressed Elements of Circular Section at Small Eccentricities. In: *Proceedings of KPI "Studies on Reinforced Concrete Structures".* Vilnius: Mintis; 1969. C. 29–35.

6. Kudzis AP. *Reinforced Concrete Structures of Circular Section*. Vilnius: Mintis; 1975. 224 p. (In Russ.).

7. Shchutskiy VL, Nasevich AS, Chubarov VE, Blyagoz AM. The Research on Bearing Capacity of Supports with Annular Section. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019;698(2):022089. https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/2/022089

8. Nasevich AS, Shchutskiy VL, Stelmakh SA, Antipov OV. Crack Strength and Deformability of Power Transmission Line Conical Poles. *Materials Science Forum.* 2018;931:304–310. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.304

9. Dedukh DA, Shchutskiy VL, Kuzmenko AA. Spun Concrete Properties of Power Transmission Line Supports. *Magazine of Civil Engineering.* 2017;7(75):37–51. https://doi.org/10.18720/MCE.75.4 (In Russ.).

Поступила в редакцию 29.08.2023
Поступила после рецензирования 13.09.2023
Принята к публикации 23.09.2023

Об авторах:

Щуцкий Виктор Лукьянович, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, vikluc75@mail.ru

Ефименко Екатерина Андреевна, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, ovekaterina90@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Щуцкий В.Л. — формирование основных целей и задач исследования, концепции статьи, научное руководство и коррекция выводов.

Ефименко Е.А. — проведение исследований и анализ результатов численного эксперимента.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 29.08.2023
Revised 13.09.2023
Accepted 23.09.2023

About the Authors:

Viktor L. Shchutskiy, Cand.Sci. (Engineering), Professor of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, vikluc75@mail.ru

Ekaterina A. Efimenko, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, ovekaterina90@yandex.ru

Claimed contributorship:

Shchutskiy VL — formulating the main aims and objectives of the research, article’s concept, scientific supervision and correction of the conclusions.

Efimenko EA — conducting the research and analysing the results of numerical experiment.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ





Научная статья

УДК 624.011.1
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-27-33

Напряженно-деформированное состояние несимметричной трехслойной балки

Х.М. Муселемов ✉, **А.И. Булгаков**, **Д.У. Муселемов**

Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала, Российская Федерация

✉ hairulla213@mail.ru

Аннотация
Введение. Трехслойная конструкция, имея небольшой вес, обладает достаточной жесткостью и прочностью для восприятия разных силовых и физических воздействий как статического, так и динамического характера. Комбинируя материалы и толщины несущих слоев и заполнителя можно добиться нужных физико-механических свойств трехслойной конструкции. В этой связи в данной работе рассматривается напряженно-деформированное состояние трехслойной балки с различной толщиной несущих слоев и высотой заполнителя.
Материал и методы. Изложен расчет трехслойной балки по известной теории расчета. В качестве примера рассматривалась трехслойная балка длиной 70 см, ее ширина менялась в зависимости от размера грани шестигранной ячейки заполнителя. Толщина несущих слоев варьировалась от 1 до 1,5 мм, толщина заполнителя — от 0,12 до 0,30 мм. Несущие слои изготавливались из алюминия АМГ2-Н, а сотовый шестигранный заполнитель — из сплава алюминия Д16-АТ.
Результаты исследования. На основании полученных данных были построены графики зависимости изменения напряжений и деформаций (прогибов) от распределенной нагрузки для каждого испытанного образца. Графические зависимости приведены для симметричной и несимметричной трехслойной балки.
Обсуждение и заключение. Полученные теоретические данные по деформациям (прогибам) и напряжениям позволили определить эффективную комбинацию несущих слоев, при которой трехслойная балка становится эффективной. На основе анализа этих данных были сделаны выводы, характеризующие повышения эффективности трехслойной балки.

Ключевые слова: несущий слой, заполнитель, напряжение, деформации, алюминий, трехслойная балка, конструктивная схема, распределенная нагрузка.

Для цитирования. Муселемов Х.М., Булгаков А.И., Муселемов Д.У. Напряженно-деформированное состояние несимметричной трехслойной балки. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):27–33. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-27-33

Original article

Stress-Strain State of an Unsymmetrical Three-Layer Beam

Khairulla M. Muselemov ✉, **Aleksander I. Bulgakov**, **Dzhabrail U. Muselemov**

Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russian Federation

✉ hairulla213@mail.ru

Abstract
Introduction. A three-layer structure, though having a small weight, possesses enough rigidity and strength to withstand various force and physical impacts of both static and dynamic nature. By altering the combination of materials and thicknesses of the loadbearing layers and the core, it is possible to achieve the desired physical and mechanical properties of a three-layer structure. In this regard, this paper investigates the stress-strain state of a three-layer beam of different thickness of loadbearing layers and height of the core.

Строительные конструкции, здания и сооружения

Materials and Methods. The three-layer beam design based on the well-known calculation methodology is presented. A three-layer 70 cm long beam was examined as an example, its width was altered depending on the face size of the hexagonal cell of the core. The thickness of loadbearing layers was altered from 1 to 1.5 mm and the thickness of the core from 0.12 to 0.30 mm. The loadbearing layers were made of the AMG2-H (АМГ2-Н) aluminium alloy, and the hexagonal honeycomb core – of the D16-AT (Д16-АТ) aluminium alloy.

Results. Based on the obtained data, the graphs of the stresses and strains (deflections) alteration dependence on the distributed load were plotted for each of the tested specimens. The graphical dependences were given for the symmetrical and unsymmetrical three-layer beams.

Discussion and Conclusion. The obtained theoretical data on deformations (deflections) and stresses allowed determining the efficient combination of the loadbearing layers, which would make a three-layer beam efficient. Based on the analysis of this data, the conclusions on enhancing the three-layer beam efficiency were made.

Keywords: loadbearing layer, core, stress, deformations, aluminum, three-layer beam, structural layout, distributed load.

For citation. Muselemov KhM, Bulgakov AI, Muselemov DU. Stress-Strain State of an Unsymmetrical Three-Layer Beam. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):27–33. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-27-33

Введение. Повышение эффективности современного строительства связано с реализацией новых конструктивно-технологических решений. Одним из важных направлений в этой сфере является создание сборных несущих покрытий зданий, эффективных не только по требованиям прочности и жесткости, но и по скорости возведения, материальным затратам и т.д. Эффективное воплощение в конструкциях этих качеств в значительной мере зависит от того, насколько принятое решение отражает в себе влияние многочисленных требований и иных определяющих факторов, отвечающих основным этапам создания конструкции: расчету, проектированию, экспериментальной обработке, технологии производства.

В настоящее время, как известно, во всем мире нашли широкое применение легкие слоистые, в частности, трехслойные конструкции [2–6], рациональное применение которых позволяет существенно снизить материалоемкость, трудоемкость изготовления, монтажа зданий, а также обеспечить высокую эффективность строительства. Трехслойные конструкции, представляющие собой композицию из двух тонких и прочных наружных слоев (обшивок) и склеенного или спаянного с ними легкого среднего слоя (заполнителя), — прогрессивный вид ограждающих элементов современных зданий. В самой идее трехслойных конструкций заложена возможность существенного улучшения характеристик удельной прочности и жесткости. Благодаря целесообразному выбору и составу отдельных слоев могут быть созданы трехслойные конструкции с отличными статическими и конструктивными свойствами.

Материалы и методы. Несущие слои изготавливаются из алюминия АМГ2-Н, а сотовый заполнитель — из сплава алюминия Д16-АТ. Длина рассматриваемой балки составляет 70 см, ширина меняется в зависимости от размера грани заполнителя и количества ячеек в ряду. Для расчета трехслойной балки необходимо знать приведенные характеристики сотовых заполнителей. Эти данные приведены в статье [7] и определены по методике, изложенной в работах [1, 8–10]. Толщина несущих слоев меняется в пределе $t_{1,2}$ = (0,1 ÷ 0,15) см. Индексы 1 и 2 относятся к нижнему и верхнему несущему слою, соответственно. Усилие q, прикладываемое к верхнему несущему слою находится в пределе от 0,01 до 0,03 МПа. Балка нагружена нагрузкой q, равномерно распределенной по поверхности. На рис. 1 показана конструктивная схема трехслойной балки.

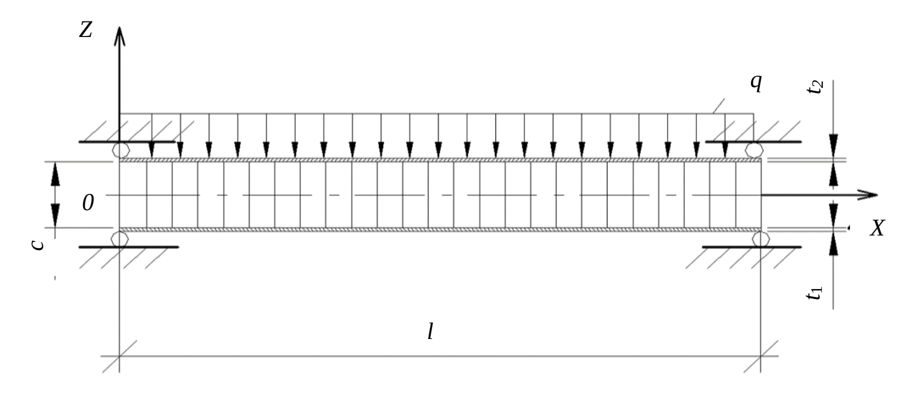


Рис. 1. Конструктивная схема трехслойной шарнирно опертой балки, нагруженной усилием q, равномерно распределенным по поверхности

Результаты исследования. Расчет проводился с целью определения прогибов и максимальных нормальных напряжений в верхнем несущем слое в середине пролета для шарнирно опертых трехслойных балок с учетом принятых форм.

Расчет трехслойных балок производился по методике, изложенной в книге Кобелева В.Н. [1]:

1. Максимальные нормальные напряжения в верхнем несущем слое равны:

$$\sigma_{12} = \frac{q \cdot \overline{B}_2}{2 \cdot B_{mp} \cdot (h_2 - h_1)^2} \cdot \left(\frac{c \cdot B_{mp}}{G_{133}} + \frac{l^2}{8} \right) - \frac{q}{h_2 - h_1} \cdot \frac{c \cdot B_{mp}}{t_1 \cdot G_{133}}.$$

2. Прогиб на расстоянии x от опоры равен:

$$W = \frac{q \cdot x}{2 \cdot B_{\text{тр}} \cdot (h_2 - h_1)^2} \cdot \left[1 \cdot \left(\frac{c \cdot B_{\text{тр}}}{G_{133}} + \frac{l^2}{2} \right) - \frac{c \cdot B_{\text{тр}}}{G_{133}} \cdot x - \frac{l \cdot x^2}{6} + \frac{x^3}{12} \right].$$

3. Максимальный прогиб в середине пролета $x = l/2$ равен:

$$W_{\max} = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot B_{mp} \cdot (h_2 - h_1)^2} \cdot \left(\frac{c \cdot B_{mp}}{G_{133}} + \frac{5 \cdot l^2}{48} \right);$$

где $\overline{B}_2 = \dfrac{2 \cdot B_{mp} \cdot (h_2 - h_1) + t_2 \cdot B_2}{t_2}$; $B_{mp} = \dfrac{B_1 \cdot B_2}{B_1 + B_2} = \dfrac{B^2}{2 \cdot B}$; $B_1 = \dfrac{E_1 \cdot t_1}{1 - \gamma_1^2}$; $B_2 = \dfrac{E_2 \cdot t_2}{1 - \gamma_2^2}$;

$h_1 = t_1 \cdot (1 + \zeta_1)/2 = 3{,}05\text{см}$; $h_2 = -t_2 \cdot (1 + \zeta_2)/2 = -3{,}05\text{см}$; $\zeta_1 = \zeta_2 = \dfrac{c}{t_{1,2}}$; $G_{133} = 0{,}879 \cdot \frac{t_{\text{ст}}}{r} \cdot G_{\text{мз}}$;

G_{133} — приведенный модуль сдвига в плоскости $x0z$; $G_{\text{мз}}$ = 270 000 кгс/см^2 — модуль сдвига заполнителя; B — жесткость стенки заполнителя.

Расчет производим для всех вариантов балок. Результаты расчета даны на графиках (рис. 2–5).

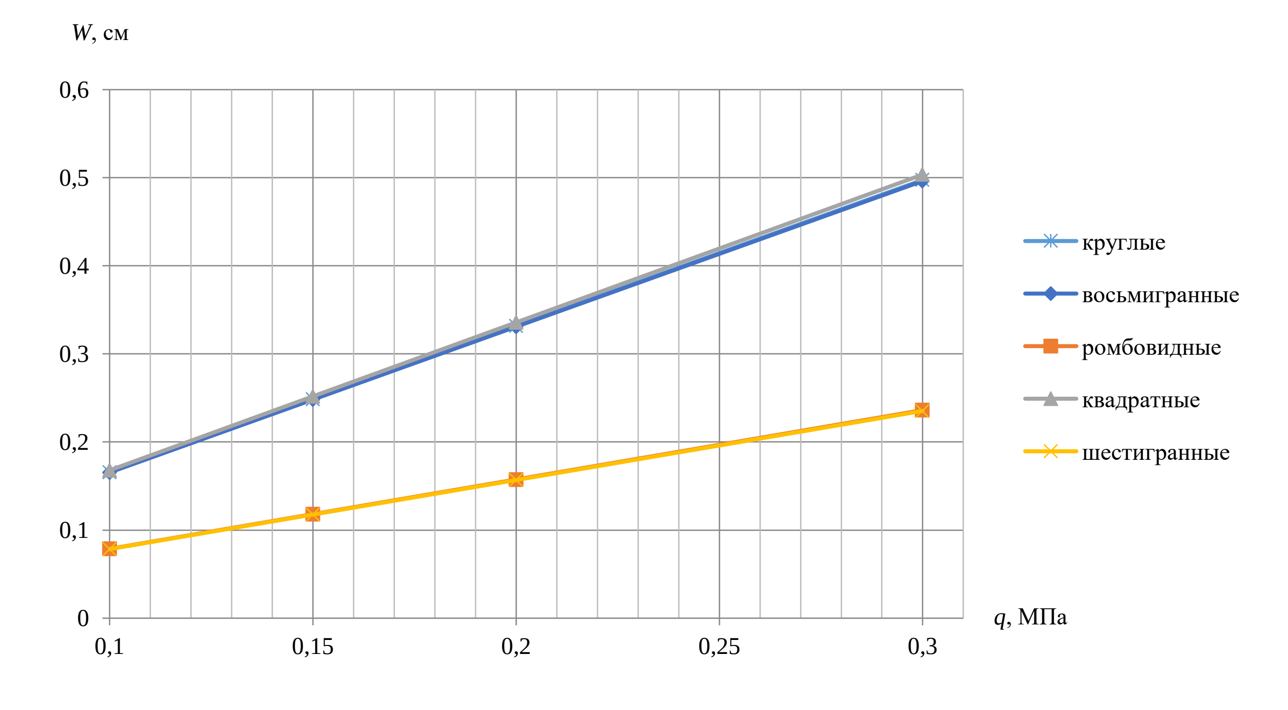


Рис. 2. Прогибы несимметричной трехслойной балки при шарнирном опирании концов в зависимости от q, для различных форм дискретного заполнителя при толщине несущих слоев t_1 = 0,10 см; t_2 = 0,15 см

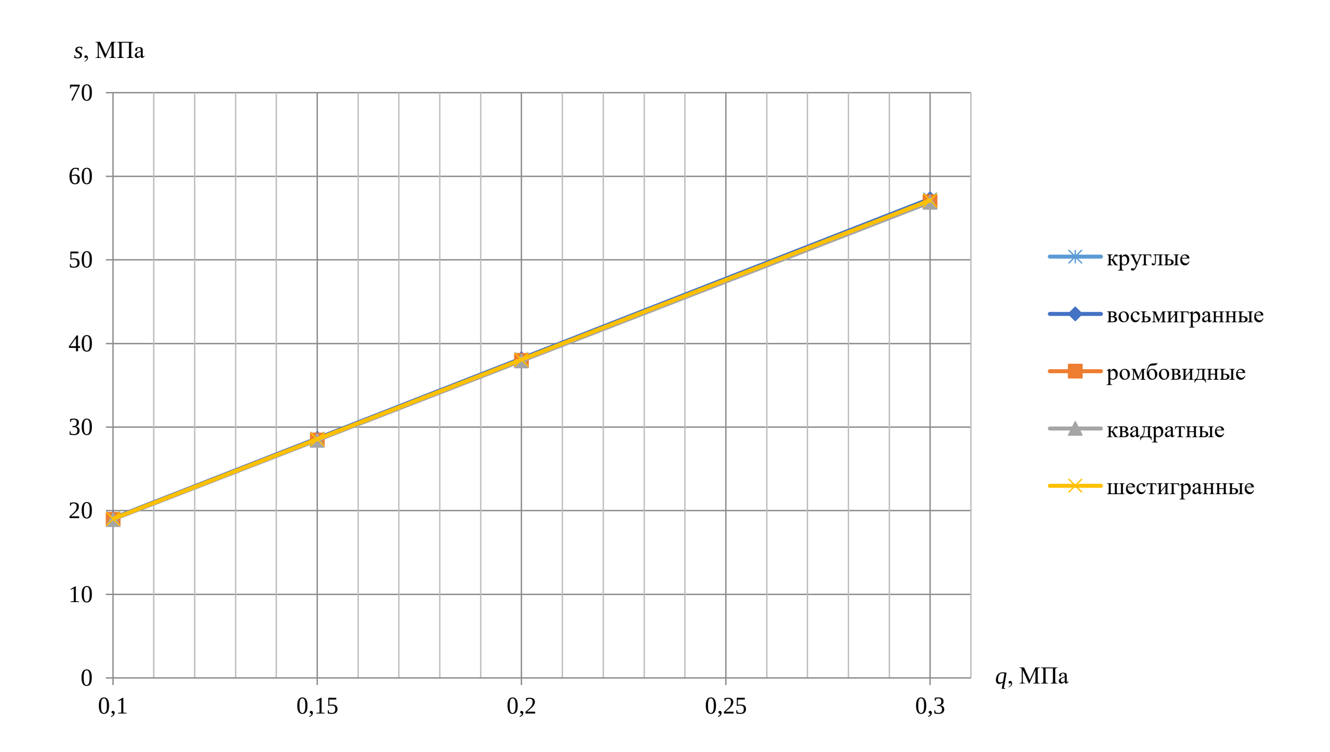


Рис. 3. Напряжения в несимметричной трехслойной балки при шарнирном опирании концов в зависимости от q, для различных форм дискретного заполнителя при толщине несущих слоев t_1 = 0,10 см; t_2 = 0,15 см

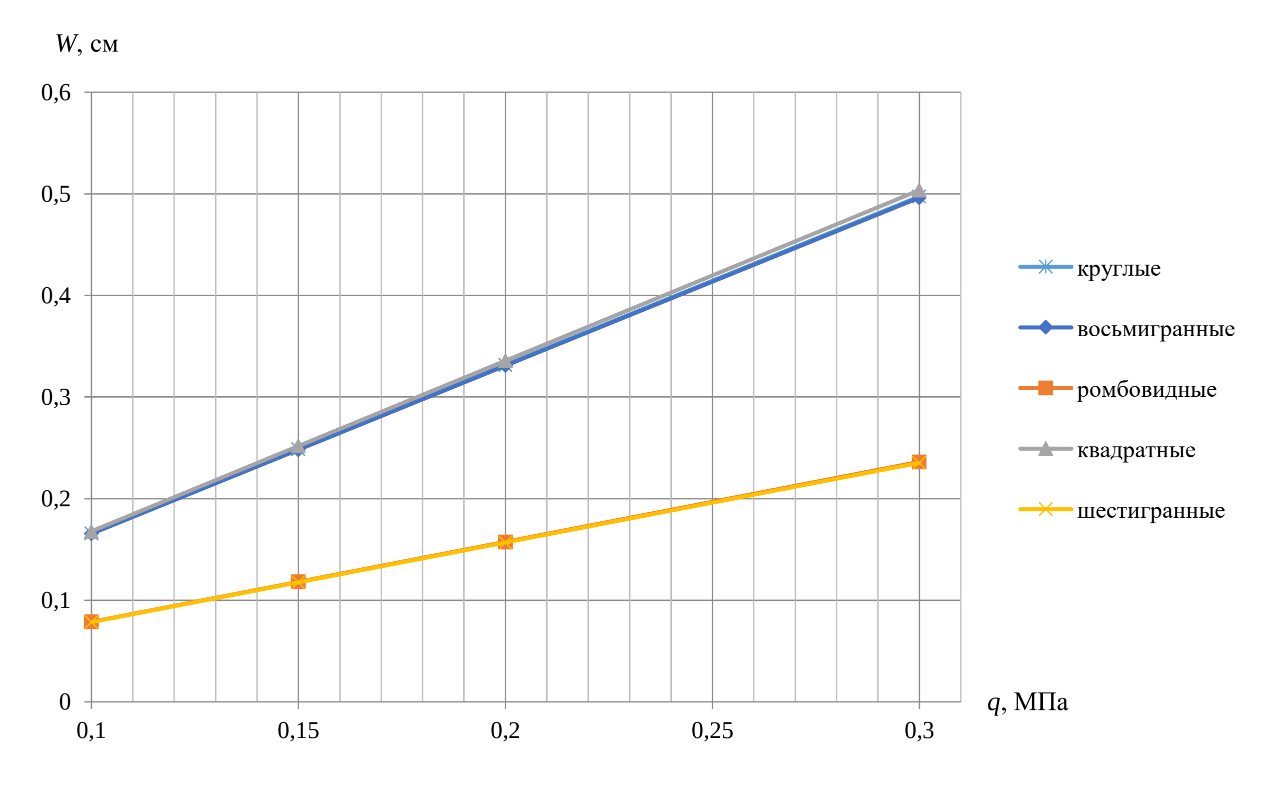


Рис. 4. Прогибы несимметричной трехслойной балки при шарнирном опирании концов в зависимости от q, для различных форм дискретного заполнителя при толщине несущих слоев t_1 = 0,15 см; t_2 = 0,10 см

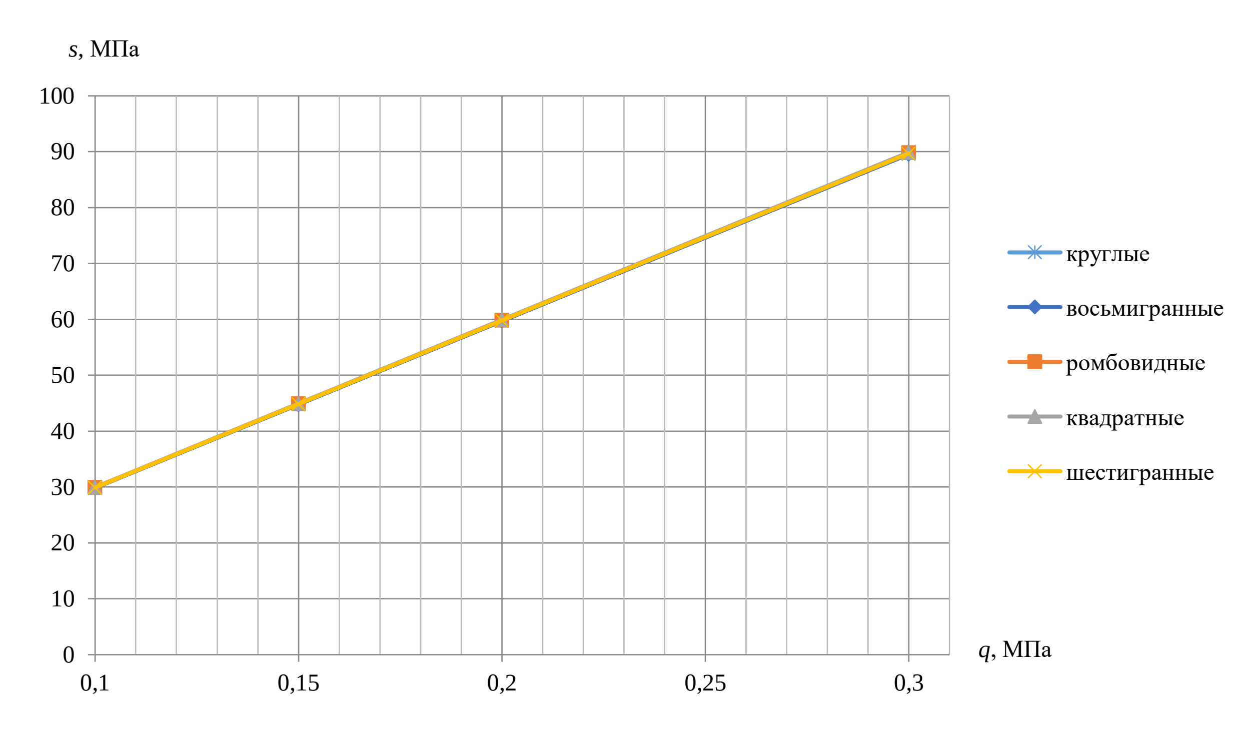


Рис. 5. Напряжения в несимметричной трехслойной балки при шарнирном опирании концов в зависимости от *q*, для различных форм дискретного заполнителя при толщине несущих слоев t_1 = 0,15 см; t_2 = 0,10 см

Обсуждение и заключения. Сравнение графиков напряжений и прогибов в зависимости от толщины несущих слоев показало, что при увеличении толщины верхнего несущего слоя с 0,1 см до 0,15 см для шарнирно опертой несимметричной балки прогибы уменьшаются на 17,35 %, напряжения уменьшаются на 35,97 %, а при увеличении толщины нижнего несущего слоя с 0,1 см до 0,15 см для шарнирно опертой несимметричной балки прогибы также уменьшаются на 17,35 %, напряжения увеличиваются на 0,58 %. Как видно из результатов, изменение толщины несущих слоев как верхнего, так и нижнего, одинаково влияют на деформативность балки — прогибы уменьшаются. А на напряжения изменение толщины несущих слоев влияет не одинаково: при увеличении толщины верхнего несущего слоя балка становится эффективнее, а при увеличении толщины нижнего несущего слоя напряжения возрастают.

Список литературы

1. Кобелев В.Н., Коварский Л.М., Тимофеев С.И. *Расчет трехслойных конструкций*. Москва: Машиностроение; 1984. 304 с.

2. Двоеглазов И.В., Халиулин В.И. К вопросу проведения экспериментальных исследований прочности складчатых заполнителей типа z-гофр на поперечное сжатие. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета).* 2012;11(5–2):275–280. https://doi.org/10.18287/2541-7533-2012-0-5-2(36)-275-281

3.Иванов А.А., Гофин М.Я. *Механика сотовых заполнителей*. Москва: Московский лесотехнический институт; 1989. 315 с.

4.Ильдияров Е.В. Экспериментально-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния трехслойной кровельной панели с ортотропным средним слоем. *Строительная механика и расчет сооружений.* 2011;(6):11–15.

5. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. *Конструкции с заполнителем*. Москва: Машиностроение; 1991. С. 15–60.

6. Паймушин В.Н. Теория устойчивости трехслойных пластин и оболочек (этапы развития, современное состояние и направления дальнейших исследований). *Известия РАН, Механика твердого тела*. 2001;(2):148–162. URL: https://mtt.ipmnet.ru/ru/Issues/2001/2/148 (дата обращения: 04.09.2023).

7. Вишталов Р.И., Муселемов Х.М., Устарханов О.М. Определение приведенных характеристик сотовых заполнителей различных форм. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.* 2016;42(3):155–166. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2016-42-3-155-166

8. Устарханов О.М., Алибеков М.С., Устарханов Т.О. Экспериментальное исследование прочности конического заполнителя для трехслойных конструкций. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* 2014;(9):54–59. https://doi.org/10.18698/0536-1044-2014-9-54-59

9. Устарханов О.М., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Экспериментальные исследования трехслойных балок с пирамидальным дискретным заполнителем. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* 2016;(2):59–64. https://doi.org/10.18698/0536-1044-2016-2-59-64

10. Устарханов О.М., Кобелев В.Н., Кобелев В.В., Абросимов Н.А. Анализ экспериментального исследования трехслойных балок с металлическим сотовым заполнителем и композиционными несущими слоями. В: *Сборник Международной научно-технической конференции «Современные научно-технические проблемы гражданской авиации»*. Москва: МГТУГА; 1999. С. 32–33.

References

1. Kobelev VN, Kovarskiy LM, Timofeev SI. *Calculation of Three-Layer Structures*. Moscow: Mashinostroenie; 1984. 304 p. (In Russ.).

2. Dvoeglazov IV, Khaliulin VI. On the Development of Experimental Methods in Research of Folded Core Type Z-Crimp on the Transverse Compressive Test Strength. *VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2012;11(5–2):275–280. https://doi.org/10.18287/2541-7533-2012-0-5-2(36)-275-281 (In Russ.).

3. Ivanov AA, Gofin MYa. *Mechanics of the Honeycomb Cores*. Moscow: Moscow Forest Engineering Institute; 1989. 315 p. (In Russ.).

4. ldiyarov EV. Experimental-Theoretical Studies of Stress-Strain State of Three-Layer Roof Panel with Orthotropic Middle Layer. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions.* 2011;(6):11–15. (In Russ.).

5. Panin VF, Gladkov YuA. *Constructions with the Core*. Moscow: Mashinostroenie; 1991. P. 15–60. (In Russ.).

6. Paimushin VN. Theory of Stability of Three-Layer Plates and Shells (Stages of Development, Present State and Directions of Further Research). *Mechanics of Solids. A Journal of Russian Academy of Sciences.* 2001;(2):148–162. URL: https://mtt.ipmnet.ru/ru/Issues/2001/2/148 (accessed: 04.09.2023). (In Russ.).

7. Vishtalov RI, Muselemov KhM, Ustarkhanov OM. The Definition of the Given Characteristics of Honeycomb Fillers of the Different Shapes. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.* 2016;42(3):155–166. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2016-42-3-155-166 (In Russ.).

8. Ustarkhanov OM, Alibekov MS, Ustarkhanov TO. Experimental Study of the Strength of a Conical Core in Sandwich Structures. *Bauman Moscow State Technical University (BMSTU) Journal of Mechanical Engineering.* 2014;(9):54–59. https://doi.org/10.18698/0536-1044-2014-9-54-59 (In Russ.).

9. Ustarkhanov OM, Muselemov HM, Ustarkhanov TO. An Experimental Study of Three-Layer Beams with Discrete Pyramidal Filler. *Bauman Moscow State Technical University (BMSTU) Journal of Mechanical Engineering*. 2016;(2):59–64. https://doi.org/10.18698/0536-1044-2016-2-59-64 (In Russ.).

10. Ustarkhanov OM, Kobelev VN, Kobelev VV, Abrosimov NA. Analysis of Experimental Study of Three-Layer Beams with Metal Honeycomb Core and Composite Loadbearing Layers. In: *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Modern Scientific and Technical Problems of Civil Aviation"*. Moscow: Moscow State Technical University of Civil Aviation (MGTUGA) Publ.; 1999. P. 32–33. (In Russ.).

Поступила в редакцию 12.09.2023
Поступила после рецензирования 22.09.2023
Принята к публикации 06.10.2023

Об авторах:

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения» Дагестанского государственного технического университета (367015, РФ, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70), кандидат технических наук, доцент, ORCID, hairulla213@mail.ru

Булгаков Александр Исакович, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения» Дагестанского государственного технического университета (367015, РФ, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70), доцент, ORCID, alexbild_58@mail.ru

Муселемов Джабраил Убайдуллаевич, студент 2-го курса специальности «Строительство уникальных зданий и сооружений» Дагестанского государственного технического университета (367015, РФ, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70), ORCID, muselemov19@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Муселемов Х.М. — формирование основной концепции, цели и задачи, научное руководство.

Булгаков А.И. — анализ результатов исследований, формирование выводов, исследования, корректировка выводов.

Муселемов Д.У. — проведение расчетов, подготовка текста.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 12.09.2023
Revised 22.09.2023
Accepted 06.10.2023

About the Authors:

Khairulla M. Muselemov, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Building Constructions and Hydraulic Structures Department, Dagestan State Technical University (70, I. Shamil Ave., Makhachkala, 367015, RF), ORCID, hairulla213@mail.ru

Aleksander I. Bulgakov, Associate Professor, Associate Professor of the Building Constructions and Hydraulic Structures Department, Dagestan State Technical University (70, I. Shamil Ave., Makhachkala, 367015, RF), ORCID, alexbild_58@mail.ru

Dzhabrail U. Muselemov, 2-nd Year Student of the Construction of Unique Buildings and Structures Major, Dagestan State Technical University (70, I. Shamil Ave., Makhachkala, 367015, RF), ORCID, muselemov19@mail.ru

Claimed contributorship:

Muselemov KhM — formulating the main concept, aim and objectives, scientific supervision.

Bulgakov AI — analysis of the research results, formulating the conclusions, experimental research, refining the conclusions.

Muselemov DU — making the calculations, preparing the text.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ





УДК 624.131.54(075.08)

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-34-45

Исследование геотехнических методов устранения кренов сооружений

А.А. Петраков ✉, **Н.А. Петракова** , **М.Д. Панасюк**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка, Российская Федерация

✉ a.a.petrakov@donnasa.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время в процессе освоения новых областей объектами производственно-хозяйственного назначения возникает необходимость в застройке территорий, которые относятся к так называемым сложным инженерно-геологическим и горно-геологическим условиям. Актуальным является решение проблемы обеспечения нормальной эксплуатации зданий и сооружений, возводимых в условиях оползнеопасных территорий, просадочных грунтов, подрабатываемых территорий.

Материал и методы. Исследованы параметры нового геотехнического метода устранения кренов сооружения путем устройства глубокой траншеи по наружному контуру части фундаментной плиты. Грунтовый массив моделируется объемными конечными элементами. Предложены зависимости для определения коэффициентов Пуассона грунта в функции от его прочностных характеристик. Задача решена с учетом последовательности выполнения строительно-монтажных работ. Для этого использован модуль «Монтаж» в ПК «Лира».

Результаты исследования. Реализация геотехнического метода устранения кренов позволяет обеспечить общую устойчивость грунтовых массивов в процессе проведения работ. При его использовании представляется возможным фиксировать максимальные давления на массив в пределах значений, незначительно отличающихся от средних давлений в стадии нормальной эксплуатации сооружения. Также с увеличением глубины компенсационной траншеи практически не изменяются величины вертикальных давлений, что приводит к смещению давлений вглубь массива грунта. Исследованы возможные причины возникновения дополнительных осадок основания при реализации данного метода устранения кренов. Установлено, что данные процессы связаны с уменьшением боковых давлений в грунтовом массиве, обусловленном увеличением податливости основания, а также с повышением краевых давлений под фундаментной плитой.

Обсуждение и заключение. Предложенный метод устранения кренов (геотехнический метод) с разработкой компенсационной траншеи по контуру фундамента здания позволяет минимизировать влияние на общую устойчивость массива и снижает влияние на расположенные в непосредственной близости здания и сооружения в процессе устранения кренов существующих фундаментов. Приведены практические рекомендации по исправлению кренов геотехническим методом.

Ключевые слова: крены фундаментов, компенсационные траншеи, геотехнический метод устранения кренов, моделирование боковых давлений в грунтовом массиве, стадии возведения сооружения

Для цитирования. Петраков А.А., Петракова Н.А., Панасюк М.Д. Исследование геотехнических методов устранения кренов сооружений. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):34–45. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-34-45

Original article

Study of the Geotechnical Methods of the Structure Tilts Elimination

Alexander A. Petrakov ✉, Natalia A. Petrakova, Mark D. Panasyuk

Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, Russian Federation

✉ a.a.petrakov@donnasa.ru

Abstract

Introduction. Nowadays, in the frame of development of the new territories, when building the industrial and business facilities, there arises the need to develop the territories having the so-called complicated engineering-geological and mining-geological conditions. Ensuring the normal operation of the buildings and structures built on the territories of the land slide hazard, subsiding soils and on the underworked territories is the problem which is relevant to solve.

Materials and Methods. The parameters of the new geotechnical method of the structure tilts elimination by digging a deep trench along the outer contour of a foundation slab's part are investigated. The soil massif is modeled by the solid finite elements. Correlations for determining the Poisson coefficients of the soil as a function of its strength properties are proposed. The problem is solved taking into account the building and mounting works sequence. For this purpose, the "Mounting works" module of the "Lira" software has been used.

Results. The implementation of the geotechnical method of eliminating the tilts allows ensuring the overall stability of the soil massifs during the works. It provides the opportunity to hold the maximum pressures acting on the massif fixed within the values slightly differing from the mean pressures of the normal operation of the structure. Moreover, deepening the compensation trench causes practically no changes of the vertical pressures values, which leads to the pressures displacements deeper into the soil massif. The possible reasons for the subfoundation extra settlements, in case of implementing this method of tilts elimination, are investigated. It has been found that these processes are related to the lateral pressures reductions in the soil massif due to the subfoundation pliability increase, as well as to the edge pressures rises beneath a foundation slab.

Discussion and Conclusion. The proposed method of tilts elimination (geotechnical method), which includes the design of a compensation trench along the building foundation contour, minimises the impact on the massif's overall stability and reduces the impact on the nearby buildings and structures during eliminating the tilts of the existing foundations. Practical recommendations for correcting the tilts by the geotechnical method are given.

Keywords: foundation tilts, compensation trenches, geotechnical method of eliminating the tilts, modeling the lateral pressures in the soil massif, works on mounting the structure

For citation. Petrakov AA, Petrakova NA, Panasyuk MD. Study of the Geotechnical Meth-ods of the Structure Tilts Elimination. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):34–45. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-34-45

Введение. Проблема исправления кренов сооружений возникает при строительстве и эксплуатации объектов строительства в сложных инженерно-геологических и горно-геологических условиях. К таким условиям относятся: просадочные и набухающие грунты, оползнеопасные и карстоопасные территории, подрабатываемые горными выработками территории и другие[1,2] [1]. В нормах строительного проектирования[3,4,5,6] [2] рассматриваются такие методы устранения кренов сооружений: подъем или опускание частей сооружения гидравлическими системами,

[1] Петраков А.А., Яркин В.В., Кухарь А.В. *Здания и сооружения в сложных инженерно-геологических и горно-геологических условиях.* Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры; 2020. 85 с. URL: https://www.iprbookshop.ru/99378.html (дата обращения: 04.09.2023).

[2] Ипатов П.П. *Инженерная геология городов*. Томск: Томский политехнический университет; 2010. 252 с. URL: https://www.iprbookshop.ru/34665.html (дата обращения: 04.09.2023).

[3] СП 22.13330.2016. *Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*.* URL: https://docs.cntd.ru/document/456054206 (дата обращения: 02.09.2023).

[4] Franck R., Baunduin C., Driscoll R., Kavvadas , Krebs Ovesen N., Orr T. et al. *Designers Guide to EN 1997–1. Eurocode 7: Geotechnical design — General rules*. London: Thomas Telford Ltd; 2004. 137 p.

[5] СП 394.1325800.2018. *Здания и комплексы высотные Правила эксплуатации.* URL: https://docs.cntd.ru/document/ 552304868 (дата обращения: 04.09.2023).

[6] Петраков А.А., Панасюк М.Д., Петракова Н.А. *Основания и фундаменты: учебное пособие для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство»*. Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры; 2021. 184 с. URL: https://www.iprbookshop.ru/120031.html (дата обращения: 02.09.2023).

пригруз поверхности основания со стороны, противоположной крену сооружения, разработка грунта под подошвой фундаментов буровыми инструментами. Как правило, производство работ по устранению кренов сооружения связано с большими трудозатратами и временным прекращением эксплуатации сооружения. Довольно часто требуются конструктивные мероприятия по обеспечению прочности сооружения и его фундаментов в процессе устранения его крена. Цель исследования — установить количественные параметры зависимости кренов фундаментной плиты от глубины компенсационной траншеи.

Авторами статьи предложен новый метод устранения кренов сооружений за счет изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива непосредственно под подошвой фундамента. Это достигается изменением граничных условий по глубине грунтового массива в вертикальных сечениях по контуру фундаментной плиты. Для этого устраиваются глубокие траншеи в грунтовом массиве по контуру фундаментной плиты, что приводит к уменьшению до нуля боковых давлений в грунте и его повышенной деформативности в указанных зонах.

Материалы и методы. Постановка задачи: на модели грунтового массива возводится жесткая фундаментная плита. Плита загружается собственным весом и распределенной нагрузкой 200 кПа. На половине наружного контура фундаментной плиты производится послойная разработка глубокой траншеи до глубины 20 м. Для учета последовательности реализации геотехнического метода устранения крена фундамента используется модуль «Монтаж» ПК «Лира» [3, 4].

Научная гипотеза: при разработке глубокой траншеи по контуру фундаментной плиты уменьшаются вплоть до нуля боковые давления в грунтовом массиве. Уменьшение боковых давлений в грунтовом массиве приводит к дополнительным осадкам фундаментов.

Для выполнения исследований разработана трехмерная расчетная конечно-элементная модель фрагмента грунтового массива и размещенной на ней жесткой фундаментной плиты [6–10]. Конечно-элементная модель разрабатывается в ПК «Лира». Грунтовый массив, сложенный песчано-глинистыми грунтами с модулем деформации 10 МПа и коэффициентом Пуассона 0,25, принят в расчетной схеме размерами 48(b)×74(l)×24(h) м. Жесткая фундаментная плита изготовлена толщиной 1 м из тяжелого бетона класса по прочности С20/25 и имеет размеры в плане 1×24 м.

Задача решается в ПК «Лира» в упругой постановке. В связи с этим требуется методическая разработка по моделированию в рамках упругой задачи активного давления грунта в стадии предельного равновесия.

Моделирование осуществляется путем сопоставления коэффициента бокового давления в упругой среде и коэффициента бокового давления в предельном состоянии сыпучей среды.[7]

В упругой среде в условиях компрессионного сжатия имеем:

$$\sigma_x = \sigma_y = \xi \cdot \sigma_z; \quad \xi = \nu/(1-\nu), \tag{1}$$

где ν — коэффициент Пуассона.

В предельном состоянии сыпучей среды имеем:

$$\xi = tg^2(45^\circ - \varphi/2), \tag{2}$$

где φ — угол внутреннего трения.

Боковое давление в предельном состоянии уменьшается за счет удельного сцепления грунта с:

$$\sigma_x = \sigma_y = -2 \cdot c \cdot tg(45^\circ - \varphi/2).$$

Поскольку удельное сцепление грунта существенно зависит от его влажности, при определении боковых давлений грунта им, как правило, пренебрегают.

Сравнивая выражения для определения коэффициентов бокового давления по формулам (1) и (2), получим формулу для определения коэффициента Пуассона грунта, при котором осуществляется моделирование в упругой задаче коэффициента бокового давления в предельном состоянии сыпучей среды:

$$\nu = tg^2(45^\circ - \varphi/2)/(1 + tg^2(45^\circ - \varphi/2)). \tag{3}$$

В таблице 1 приводятся в функции от угла внутреннего трения грунта значения коэффициентов Пуассона, вычисленные по формуле (3), и соответствующие значения коэффициентов бокового давления — по формулам (1) и (2).

[7] Шапиро Д.М. *Нелинейная механика грунтов.* Москва: Ай Пи Ар Медиа; 2021. 117 с. URL: https://www.iprbookshop.ru/108312.html (дата обращения: 02.09.2023).

Таблица 1

Результаты моделирования боковых давлений грунта в упругой задаче

Коэффициенты	Углы внутреннего трения грунта, град.		
	30	18	10
Бокового давления $\xi(\varphi)$ по формуле (2)	0,33	0,54	0,70
Пуассона $\nu(\varphi)$ по формуле (3)	0,25	0,35	0,41
Бокового давления $\xi(\nu)$ по формуле (1)	0,33	0,54	0,70

Из таблицы 1 следует, что принятый в исходных данных коэффициент Пуассона грунтового массива 0,25 соответствует песчано-глинистому грунту с углом внутреннего трения $\varphi = 30^{o}$.

Для решения задачи выполнено моделирование 13-ти стадий возведения сооружения. Стадия 1 предполагает создание грунтового массива путем монтажа его элементов. Стадия 2 предполагает монтаж и загрузку фундаментной плиты. Стадии 3–12 реализуют геотехнический метод устранения крена сооружения путем последовательного демонтажа слоев грунта в компенсационной траншее. Характеристика загружений и стадий возведения приведена в таблице 2.

Таблица 2

Загружения и стадии возведения и реализации геотехнического метода устранения кренов фундамента

Стадии возведения	Нагружения	Схемы стадий возведения
Стадия 1 **Монтируемые элементы** Все элементы грунтового массива **Демонтируемые элементы** Отсутствуют	**Нагружение 1** Нагрузки отсутствуют	
Стадия 2 **Монтируемые элементы** Конечные элементы фундаментной плиты **Демонтируемые элементы** Отсутствуют	**Нагружение 2** – собственный вес плиты – распределенная нагрузка на плиту 200 кПа	
Стадия 3 **Монтируемые элементы** Отсутствуют **Демонтируемые элементы** Слой грунта в траншее от 0 до 2 м	**Нагружение 3** Нагрузки отсутствуют	
Стадия 4 **Монтируемые элементы** Отсутствуют **Демонтируемые элементы** Слой грунта в траншее от 2 до 4 м	**Нагружение 4** Нагрузки отсутствуют	

Стадии возведения	Нагружения	Схемы стадий возведения
Стадия 5 **Монтируемые элементы** Отсутствуют **Демонтируемые элементы** Слой грунта в траншее от 4 до 6 м	**Нагружение 5** Нагрузки отсутствуют	
Стадия 6 **Монтируемые элементы** Отсутствуют **Демонтируемые элементы** Слой грунта в траншее от 6 до 8 м	**Нагружение 6** Нагрузки отсутствуют	
Стадия 7 **Монтируемые элементы** Отсутствуют **Демонтируемые элементы** Слой грунта в траншее от 8 до 10 м	**Нагружение 7** Нагрузки отсутствуют	
Стадия 8 **Монтируемые элементы** Отсутствуют **Демонтируемые элементы** Слой грунта в траншее от 10 до 12 м	**Нагружение 8** Нагрузки отсутствуют	
Стадия 9 **Монтируемые элементы** Отсутствуют **Демонтируемые элементы** Слой грунта в траншее от 12 до 14 м	**Нагружение 9** Нагрузки отсутствуют	

Стадии возведения	Нагружения	Схемы стадий возведения
Стадия 10 **Монтируемые элементы** Отсутствуют **Демонтируемые элементы** Слой грунта в траншее от 14 до 16 м	**Нагружение 10** Нагрузки отсутствуют	
Стадия 11 **Монтируемые элементы** Отсутствуют **Демонтируемые элементы** Слой грунта в траншее от 16 до 18 м	**Нагружение 11** Нагрузки отсутствуют	
Стадия 12 **Монтируемые элементы** Отсутствуют **Демонтируемые элементы** Слой грунта в траншее от 18 до 20 м	**Нагружение 12** Нагрузки отсутствуют	
Стадия 13* **Монтируемые элементы** Отсутствуют **Демонтируемые элементы** Отсутствуют	**Нагружение 13** Распределенная нагрузка на плиту 50 кПа	

Примечание: Стадия 13 является завершающей стадией, в которой монтируемые и демонтируемые элементы должны отсутствовать, но должна присутствовать завершающая нагрузка

Результаты исследования. Анализу подвержены осадки и крены фундаментной плиты и напряжения в грунтовом массиве.

Численные значения осадок и кренов фундаментной плиты представлены на графиках (рис. 1 и рис. 2). На этих рисунках осадки и крены приведены в функции от глубины компенсационной траншеи для характерных сечений плиты: у левого края (L = 0 м), в центре плиты (L = 12 м) и у правого края (L = 24 м). Анализ графиков на рис. 1, 2 позволяет сделать следующие выводы.

Подтверждена научная гипотеза о том, что при разработке компенсационной траншеи и уменьшении боковых давлений в грунтовом массиве происходит дополнительная осадка основания (рис. 1). Зависимости изменения дополнительной осадки основания от глубины компенсационной траншеи характеризуются градиентами. Градиент или скорость осадки определяется в данном случае как отношение приращения дополнительной осадки к приращению глубины компенсационной траншеи. Как следует из графиков на рис. 1, максимальные градиенты изменения осадок относятся к левому торцу плиты ($L = 0$). В начале разработки компенсационной траншеи градиент составляет 25 мм/м, а в конце разработки — 8 мм/м, т. е. уменьшается примерно в три раза. Можно предположить, что с определенной отметки глубина компенсационной траншеи не будет оказывать существенного влияния на величины дополнительных осадок основания. Градиент изменения осадки правого торца плиты ($L = 24$ м) практически равен нулю. Последнее свидетельствует о том, что реализация геотехнического метода устранения кренов не влияет на осадки плиты с противоположной стороны компенсационной траншеи. Градиенты изменения осадок в центре плиты составляют от 5 мм/м в начале процесса до 2 мм/м в конце процесса. Можно полагать, что центр плиты находится в области нейтральной оси.

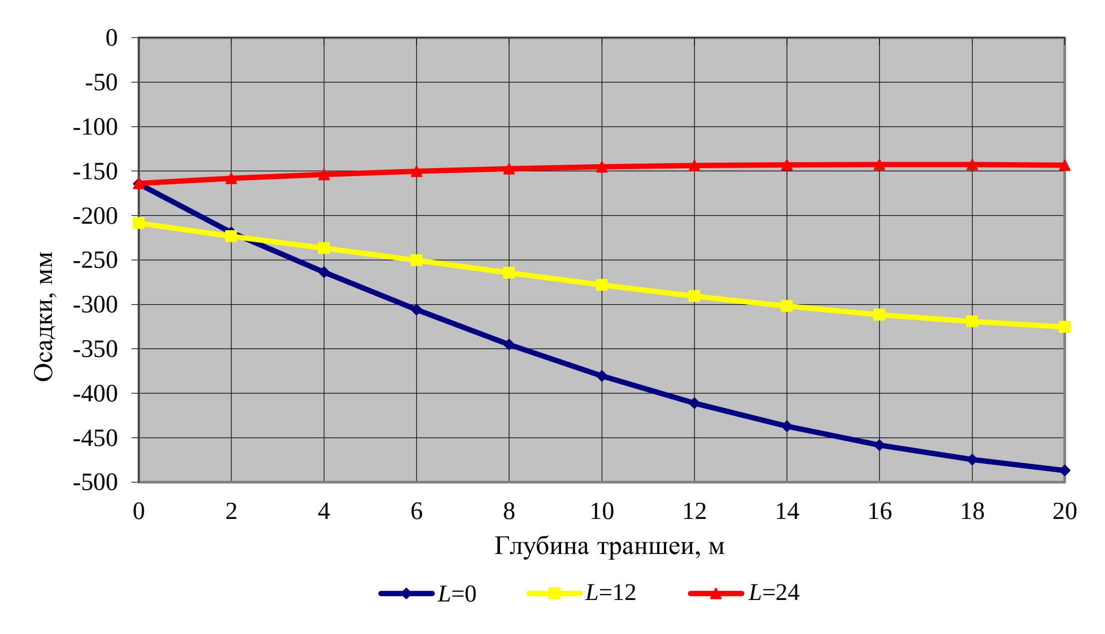


Рис. 1. Осадки основания фундаментной плиты (мм) при устройстве компенсационной траншеи глубиной до 20 м

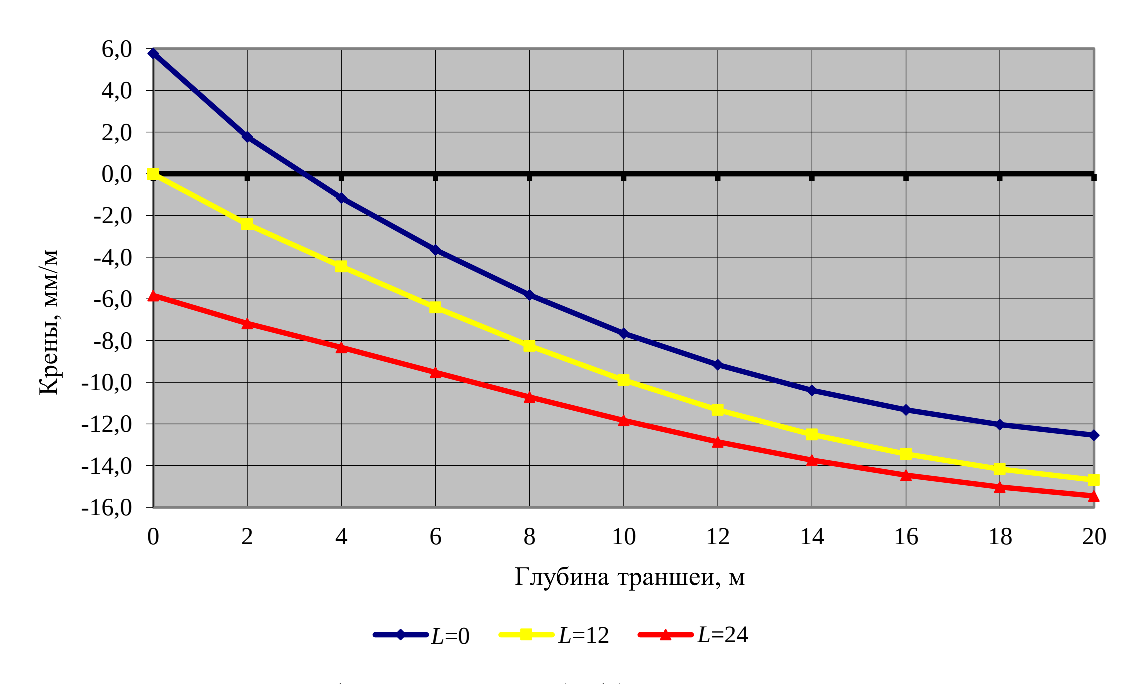
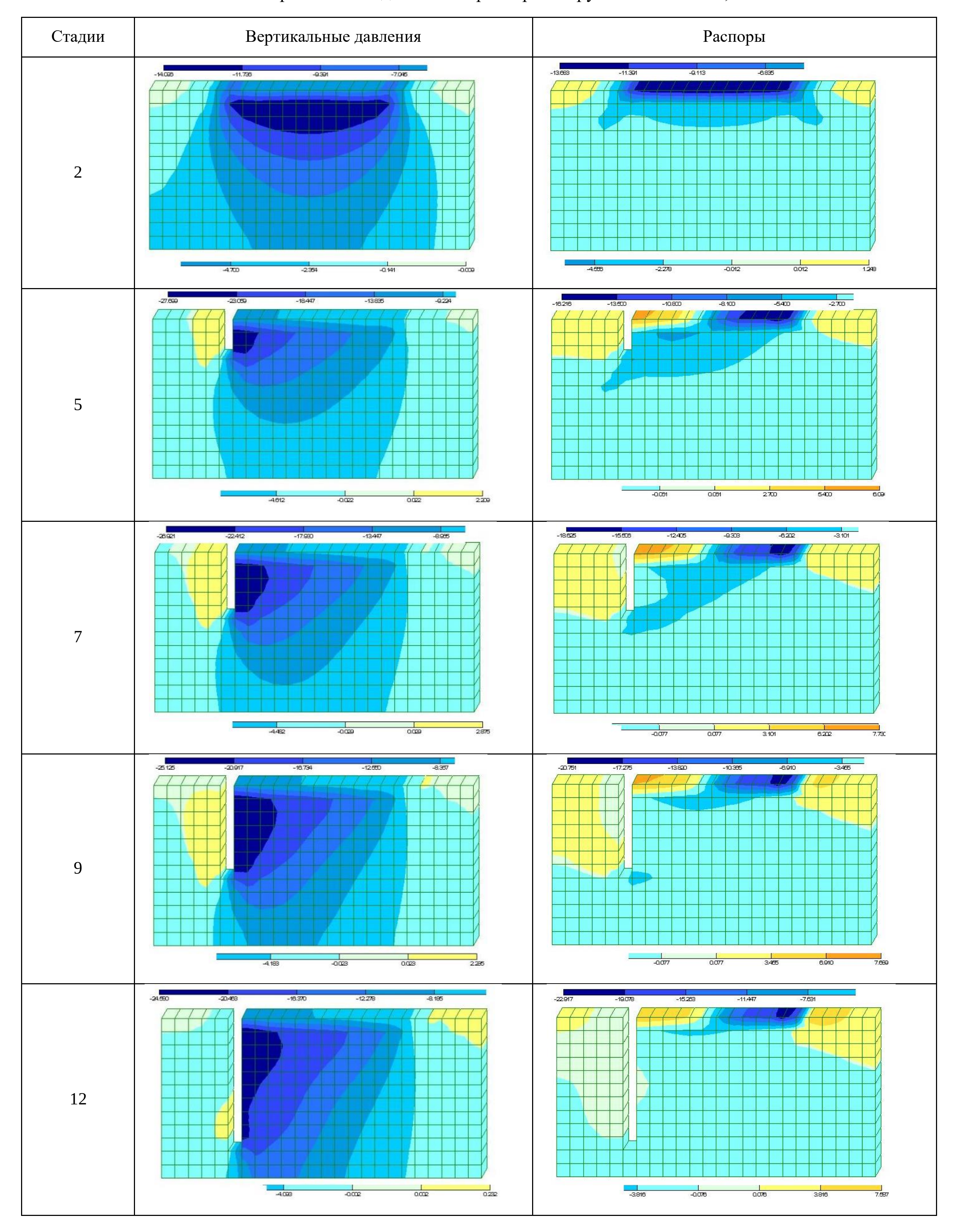


Рис. 2. Крены основания фундаментной плиты (мм/м) при устройстве компенсационной траншеи глубиной до 20 м

Таблица 3

Мозаики вертикальных давлений и распоров в грунтовом массиве, тс/м^2



Стадии	Вертикальные давления	Распоры
2		
5		
7		
9		
12		

Разность осадок торцов плиты в конце процесса устранения кренов составляет 380 мм, что соответствует среднему градиенту изменения осадки 19 мм/м. Этот параметр можно принять в качестве расчетного при проектировании геотехнических методов устранения кренов сооружений.

В процессе реализации геотехнического метода устранения кренов абсолютные величины изменения кренов фундаментной плиты составили (рис. 2): у торца компенсационной траншеи — 18 мм/м; в центре плиты — 15 мм/м; у торца плиты, противоположного компенсационной траншее — 10 мм/м.

В результате проведенных исследований выявлено, что геотехнический метод устранения кренов сооружений за счет устройства глубокой траншеи по периметру фундаментной плиты является работоспособным и позволяет устранять недопустимые крены сооружений величиной до 18 мм/м.

Мозаики вертикальных давлений и распоров в продольном сечении грунтового массива для характерных стадий возведения сооружения представлены в таблице 3. Численные значения вертикальных давлений в грунтовом массиве представлены на графиках (рис. 3).

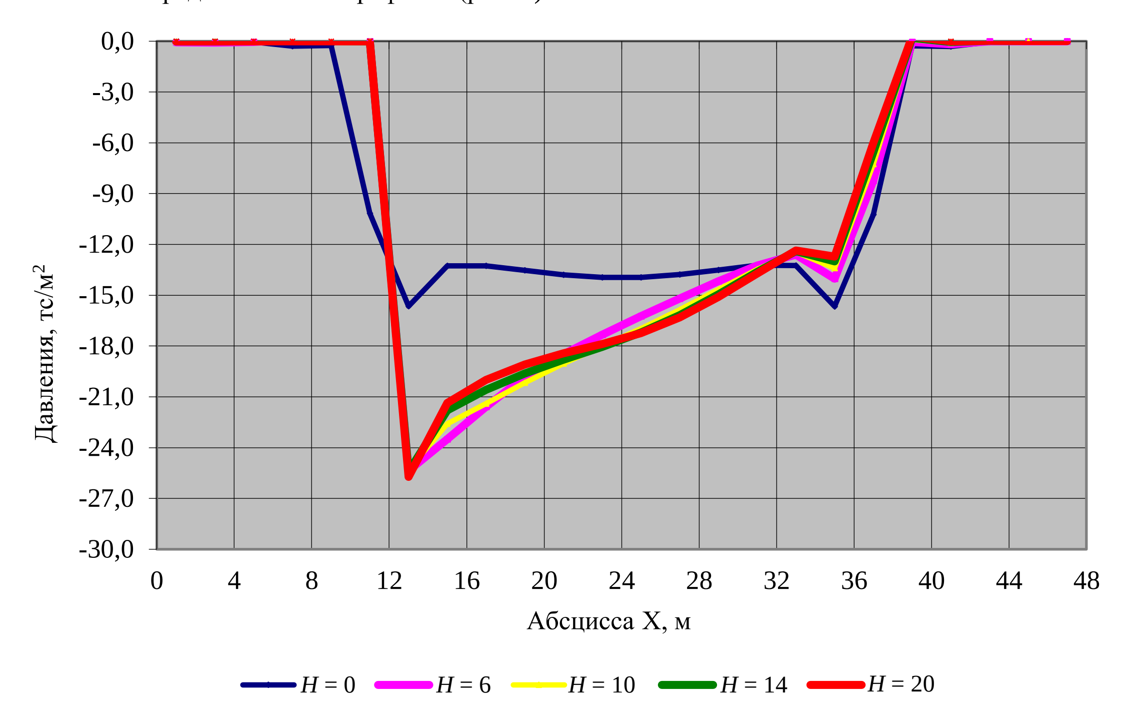


Рис. 3. Давления (тс/м^2) в грунте в продольном сечении плиты при разработке грунта в компенсационной траншее глубиной: 0,0 м — стадия 2 (H = 0); 6 м — стадия 5 (H = 6); 10 м — стадия 7 (H = 10); 14 м — стадия 9 (H = 14); 20 м — стадия 12 (H = 20)

Анализ мозаик вертикальных давлений и распоров в грунтовом массиве (таблица 3) и графиков вертикальных давлений на уровне подошвы фундамента (рис. 3) позволяет сделать следующие выводы.

Эпюра отпора грунта при действии нагрузки (рис. 3, H = 0) имеет зоны концентраций давлений по контуру загруженной поверхности. Это объясняет форму деформирования плиты в виде прогиба. При реализации геотехнического метода устранения крена давления в грунте у края плиты со стороны компенсационной траншеи увеличиваются в 1,7 раза. С противоположной стороны плиты давления практически не изменяются. В центре плиты давления увеличиваются в 1,25 раза. Следует отметить, что увеличение вертикальных давлений на основание у края компенсационной траншеи реализуется до ее глубины, равной примерно 6 м. Последующее увеличение глубины траншеи практически не влияет на величины вертикальных давлений и приводит к смещению максимумов давлений в глубину грунтового массива.

Таким образом, причиной возникновения дополнительных осадок плиты при реализации геотехнического метода устранения кренов является как увеличение податливости основания в связи с уменьшением боковых давлений в грунтовом массиве, так и повышение краевых давлений под фундаментной плитой.

Особенностью формирования распоров в грунтовом массиве у края плиты является удерживающее влияние на поверхности основания конструкции фундамента. По этой причине (таблица 3) на всех стадиях возведения сооружения распоры на поверхности основания имеют практически одинаковые значения и свидетельствуют о растяжении грунтового массива в горизонтальном направлении. С увеличением глубины компенсационной траншеи смещаются по глубине максимумы эпюр распоров. Затухание эпюр распоров по глубине грунтового массива от максимальных значений происходит при всех значениях глубины траншеи по практически аналогичным закономерностям. Таким образом, устойчивость стенок компенсационной траншеи обеспечивается армирующим влиянием фундаментов на поверхности основания.

В проведенных исследованиях максимальные давления на грунтовый массив в процессе реализации геотехнического метода устранения кренов фундаментов возрастают не более чем в два раза по сравнению со средними давлениями в стадии нормальной эксплуатации сооружения. Таким образом, в процессе реализации геотехнического метода устранения кренов фундаментов общая устойчивость грунтового массива обеспечена. При завершении процесса устранения кренов фундаментов компенсационная траншея подвергается обратной засыпке с послойным уплотнением грунта.

Обсуждение и заключение. Подтверждена научная гипотеза о том, что при разработке компенсационной траншеи по контуру фундаментной плиты и уменьшении боковых давлений в грунтовом массиве происходит дополнительная осадка основания. Такой метод устранения кренов сооружения назван геотехническим. Зависимости изменения дополнительной осадки основания от глубины компенсационной траншеи характеризуются переменными градиентами. Градиент или скорость осадки определяется в этом случае как отношение приращения дополнительной осадки к приращению глубины компенсационной траншеи. По результатам исследований максимальные градиенты изменения дополнительных осадок составляют 25 мм/м в начале процесса и 8 мм/м в конце разработки траншеи. Таким образом, скорость дополнительной осадки основания уменьшается при увеличении глубины компенсационной траншеи примерно в три раза. С определенной отметки глубина компенсационной траншеи не будет оказывать существенного влияния на величины дополнительных осадок основания.

При реализации геотехнического метода устранения кренов существенно увеличиваются вертикальные давления в грунтовом массиве со стороны торца компенсационной траншеи. С учетом этого причиной возникновения дополнительных осадок основания при реализации геотехнического метода устранения кренов является как увеличение податливости основания в связи с уменьшением боковых давлений в грунтовом массиве, так и повышение краевых давлений под фундаментной плитой.

Список литературы

1. Яркин В.В. *Моделирование системы «Основание – фундамент – сооружение» в сложных инженерно-геологических условиях: монография.* Петраков А.А. (ред.). Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры; 2020. 392 с. URL: https://www.iprbookshop.ru/93864.html (дата обращения: 02.09.2023).

2. Belyaev V. Characteristics and problems of the standardization of urban design in the development of urban underground space. *Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019).* 2020;164:04034 https://doi.org/10.1051/e3sconf/20201640403

3. Стрелец–Стрелецкий Е.Б, Журавлев А.В., Водопьянов Р.Ю. *ЛИРА–САПР. Книга I. Основы.* А.С. Городецкий (ред). LIRALAND; 2019. 154 с.

4. Petrakov A.A., Petrakova N.A., Panasyuk M.D. Solving non-linear problems of the finite over elements by Newton method. *Modern Industrial and Civil Construction.* 2017;13(3):169–178.

5. Petrakov A.A., Petrakova N.A., Panasyuk M.D. The study of the limiting conditions of the soil massif. The study of equations of state of the theory of plastic flow. *World Geotechnics.* 2017;4(56):20–25.

6. Lertora E., Campanella D., Mandolfino C., Gambaro C., Fratini L., Buffa G. Comparison Between FSW and Bonded Lap Joints — a Preliminary Investigation. *AIP Conference Proceedings*. 2017;1896(1):110004. https://doi.org/10.1063/1.5008131

7. Huang M.Q., Nini´c J., Zhang Q.B., BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: current status and future perspectives. *Tunnelling and Underground Space Technology.* 2021;108:103677. https://doi. org/10.1016/j.tust.2020.103677

8. Mohammadi M.M., Najafi M., Kermanshachi S., Kaushal V., Serajiantehrani R. Factors influencing the condition of sewer pipes: state-of-the- art review. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2020;11(4):03120002. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000483

9. Salihu C., Hussein M., Mohandes S.R., Zayed T., Towards a comprehensive review of the deterioration factors and modeling for sewer pipelines: a hybrid of bibliometric, scientometric, and meta-analysis approach. *Journal of Cleaner Production*. 2022;351:131460. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131460

10. Tscheikner-Gratl F., Caradot N., Cherqui F., Leitao J.P., Ahmadi M., Langeveld J.G. et al. Sewer asset management — state of the art and research needs. *Urban Water Journal*. 2019;16(9):662–675. https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1713382

References

1. Yarkin VV. *Modeling the "Subfoundation — Foundation — Structure" System in the Complicated Engineering-Geological Conditions. Monograph*. Petrakov AA (ed.). Makeyevka: Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture; 2020. 392 p. URL: https://www.iprbookshop.ru/93864.html (In Russ.) (assecced: 02.09.2023).
2. Belyaev V. Characteristics and problems of the standardization of urban design in the development of urban underground space. *Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019).* 2020;164:04034 https://doi.org/10.1051/e3sconf/20201640403
3. Strelets–Streletsky EB, Zhuravlev AV, Vodopyanov RY. *LIRA–SAPR. Book I. Fundamentals*. Gorodetsky AS (ed.). LIRALAND; 2019. 154 p. (In Russ.).
4. Petrakov A.A., Petrakova N.A., Panasyuk M.D. Solving non-linear problems of the finite over elements by Newton method. *Modern Industrial and Civil Construction.* 2017;13(3):169–178.
5. Petrakov A.A., Petrakova N.A., Panasyuk M.D. The study of the limiting conditions of the soil massif. The study of equations of state of the theory of plastic flow. *World Geotechnics.* 2017;4(56):20–25.
6. Lertora E., Campanella D., Mandolfino C., Gambaro C., Fratini L., Buffa G. Comparison Between FSW and Bonded Lap Joints — a Preliminary Investigation. *AIP Conference Proceedings*. 2017;1896(1):110004. https://doi.org/10.1063/1.5008131
7. Huang M.Q., Nini´c J., Zhang Q.B., BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: current status and future perspectives. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021;108:103677. https://doi. org/10.1016/j.tust.2020.103677
8. Mohammadi M.M., Najafi M., Kermanshachi S., Kaushal V., Serajiantehrani R. Factors influencing the condition of sewer pipes: state-of-the- art review. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2020;11(4):03120002. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000483
9. Salihu C., Hussein M., Mohandes S.R., Zayed T., Towards a comprehensive review of the deterioration factors and modeling for sewer pipelines: a hybrid of bibliometric, scientometric, and meta-analysis approach. *Journal of Cleaner Production*. 2022;351:131460. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131460
10. Tscheikner-Gratl F., Caradot N., Cherqui F., Leitao J.P., Ahmadi M., Langeveld J.G. et al. Sewer asset management — state of the art and research needs. *Urban Water Journal*. 2019;16(9):662–675. https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1713382

Поступила в редакцию 10.09.2023
Поступила после рецензирования 22.09.2023
Принята к публикации 06.10.2023

Об авторах:

Петраков Александр Александрович, заведующий кафедрой «Основания, фундаменты, подземные сооружения» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (286123, РФ, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2), доктор технических наук, профессор, a.a.petrakov@donnasa.ru

Петракова Наталья Александровна, доцент кафедры «Основания, фундаменты, подземные сооружения» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (286123, РФ, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2), кандидат технических наук, ORCID, n.o.petrakova@donnasa.ru

Панасюк Марк Дмитриевич, ассистент кафедры «Основания, фундаменты, подземные сооружения» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (286123, РФ, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2), магистр, m.d.panasuk@donnasa.ru

Заявленный вклад соавторов:
Петраков А.А. — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, формирование выводов.
Петракова Н.А. — подготовка текста, формирование выводов.
Панасюк М.Д. — выполнение численных исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 10.09.2023
Revised 22.09.2023
Accepted 06.10.2023

About the Authors:

Alexander A. Petrakov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Subfoundations, Foundations, Subsurface Structures Department, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (2, Derzhavina str., Makeyevka, 286123, RF), a.a.petrakov@donnasa.ru

Natalia A. Petrakova, Cand.Sci. (Engineering.), Associate Professor of the Subfoundations, Foundations, Subsurface Structures Department, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (2, Derzhavina str., Makeyevka, 286123, RF), ORCID, n.o.petrakova@donnasa.ru

Mark D. Panasyuk, MEng., Assistant of the Subfoundations, Foundations, Subsurface Structures Department, Donbass National Academy of Civil Engi-neering and Architecture (2, Derzhavina str., Makeyevka, 286123, RF), m.d.panasuk@donnasa.ru

Claimed contributorship:

Petrakov AA — formulating the main concept, aims and objectives of the re-search, formulating the conclusions.
Petrakova NA — text preparation, formulating the conclusions.
Panasyuk MD — carrying out the numerical research.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ





УДК 691.4;552.55

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-46-58

Технология и особенности производства крупноформатных керамических камней на основе опоковидных пород

В.Д. Котляр ✉, Ю.В. Терёхина , К.А. Лапунова



Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ diatomit_kvd@mail.ru

Аннотация

Введение. Одной из актуальных задач производства стеновой керамики в настоящее время является производство крупноформатных керамических камней с прочностью при сжатии 10–15 МПа и теплопроводностью менее 0,12 Вт/(м·°С), при этом рыночная стоимость за 1 м^3 должна быть конкурентоспособной по отношению к газобетонным блокам и находиться в пределах 5–6 тысяч рублей за 1 м^3. Решить эту задачу возможно за счет разработки современной энергоэффективной технологии производства и использования в качестве основного сырья опоковидных пород и отходов углеобогащения в качестве топлива и выгорающей добавки.

Материалы и методы. Для исследований использовались опоковидные породы — опоки месторождений юга России — Нагольновское, Баканское, Шахтинское, Авило-Федоровское, угольный кек производства ООО «Пирамида». Изучение химического и минерального состава проводилось стандартными методами на подготовленных образцах. Изучение керамических и технологических свойств (пластичность, формовочная влажность, степень измельчения, воздушная и огневая усадки, прочность при сжатии, водопоглощение) сырья проводилось по общепринятым методикам на предварительно измельченных до определенного зернового состава пробах, так как опоки, в зависимости от вида, не размокают или медленно размокают в воде.

Результаты исследования. Подтверждены дообжиговые технологические свойства опок и их отличия от традиционного размокаемого в воде глинистого сырья: повышенная формовочная влажность, небольшая воздушная усадка, малая чувствительность к сушке. Установлены зависимости плотности и прочности образцов от степени измельчения опок, температуры обжига и количества угольного кека в составе сырьевой смеси. Определено влияние отходов углеобогащения и их оптимальное количество на физико-механические свойства обожженных образцов. Ввод угольного кека позволяет исключить использование газа для обжига или минимизировать его ввод. На основе полученных результатов разработана упрощенная технологическая схема производства крупноформатных камней с минимальной себестоимостью.

Обсуждение и заключение. Предлагаемая технологическая схема состоит из двух единиц основного массоподготовительного оборудования, формование изделий осуществляется способом полужесткой экструзии, сушка изделий производится непосредственно на обжиговых вагонетках, а для обжига используется угольный кек, который вводится в состав сырьевой смеси. Указанные факторы и технологические приемы позволяют получать изделия с низкой теплопроводностью, но с прочностью в 3–5 раз выше, чем у газобетонных блоков аналогичной плотности. Себестоимость керамических камней составит 3–3,5 тысячи рублей за 1 м^3 изделий. Ростовская область, обладающая запасами опоковидных пород и невостребованными запасами техногенного угольного сырья, может стать центром производства крупноформатных керамических камней с низкой стоимостью и обеспечить юг и центральную часть страны высококачественными стеновыми материалами.

Ключевые слова: технология, опоки, керамический камень, выгорающие добавки, водопоглощение, пористость, прочность, теплопроводность, формование, обжиг

Для цитирования. Котляр В.Д., Терёхина Ю.В., Лапунова К.А. Технология и особенности производства крупноформатных керамических камней на основе опоковидных пород. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):46–58. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-46-58

Original article

Technology and Specifics of the Large-Sized Ceramic Stones Manufacture from the Opoka Rocks

Vladimir D. Kotlyar ✉, **Yuliya V. Terekhina**, **Kira A. Lapunova**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ diatomit_kvd@mail.ru

Abstract

Introduction. At present one of the pressing issues of the wall ceramics production is manufacturing the large-sized ceramic stones with compressive strength of 10–15 MPa, thermal conductivity less than 0.12 W/(m ·°C) and market price of 5000–6000 rubbles per 1 m^3, which would be able to compete with the foam concrete blocks. This task can be solved by developing a modern energy-efficient technology of production and using the opoka rocks as the main raw material and the by-products of coal benefication as the fuel-burning additive.

Materials and Methods. The opoka rocks of the southern Russia deposits Nagolnovskoye, Bakanskoye, Shakhtinskoye, Avilo-Fyodorovskoye and the coal slurry produced at the Pyramida LLC were used for the research. The study of the chemical and mineral composition was carried out on the prepared specimens using the standard methods. The study of the ceramic and technological properties of raw material (plasticity, molding water content, degree of fineness, air and firing shrinkage, compressive strength, water absorption) was carried out according to the common methodology, using the test specimens preground to a certain grain-size composition. This was required because, depending on the opoka type, it might not swell or swell slowly on wetting.

Results. Pre-firing technological properties of the opoka rocks and their differences from the traditional, swelling on wetting, clay raw materials were confirmed: increased molding water content, small air shrinkage, low sensitivity to drying. The dependence of the specimens' density and strength on opoka degree of fineness, firing temperature and the amount of coal slurry in the raw-material mixture has been established. The optimal amount and influence of the coal benefication by-products on the physical and mechanical properties of the firing specimens have been determined. Adding the coal slurry has made it possible to exclude or minimize the use of gas for firing. On the basis of the obtained results a simplified process flow chart for the minimal prime cost manufacture of the large-sized stones has been developed.

Discussion and Conclusion. The proposed process flow chart comprises two basic units of mixture preparing equipment, the molding of products is carried out by semi-solid extrusion, the drying of products is carried out directly in kiln cars, whereas the coal slurry added into the raw mixture is used for firing. These factors and technological methods allow getting the products with the low thermal conductivity, but with the strength 3–5 times higher than that of the similar density foam concrete blocks. The ceramic stones prime cost will amount to 3000–3500 rubbles per 1 m^3 of products. The deposits of the opoka rocks and stock of the unused technogenic coal raw material available in Rostov region can make it a centre of the low cost large-sized ceramic stones manufacture and ensure supply of the high-quality wall materials to the southern and central parts of the country.

Keywords: technology, opoka rocks, ceramic stone, burning additives, water absorption, porosity, strength, thermal conductivity, molding, firing.

For citation. Kotlyar VD, Terekhina YuV, Lapunova , KA. Technology and Specifics of the Large-Sized Ceramic Stones Manufacture from the Opoka Rocks. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):46–58. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-45-58

Введение. Крупноформатные керамические камни с номинальной толщиной более 140 мм и формата 6,9–14,9 НФ в нашей стране стали производить и применять в строительстве относительно недавно — последние 10–15 лет, хотя в Западной Европе и США их производство известно достаточно давно, а широкое применение началось с 80-х годов прошлого века [1–5]. Производимые в настоящее время крупноформатные керамические камни имеют относительно

низкую среднюю плотность – менее 800 кг/м^3, которая достигается за счет большой вертикальной пустотности изделий — 50–60 %, теплопроводность – менее 0,20 Вт/(м·°С), морозостойкость более 35 циклов, при этом прочность при сжатии составляет 10–12,5 МПа, что вполне достаточно для стеновых изделий. Указанные характеристики крупноформатных керамических камней позволяют использовать их как для ограждающих, так и для самонесущих и несущих конструкций. Основным конкурентом керамических камней на рынке стеновых материалов являются блоки из ячеистого бетона автоклавного твердения — газоблоки, объем производства которых в настоящее время существенно больше в сравнении с керамическими камнями. По данным за 2022 год объем производства керамических камней составляет около 10 млн. м^3, а объем производства газоблоков — около 15 млн. м^3 [6–7].

Основными конкурентными преимуществами блоков из автоклавного газобетона, в сравнении с керамоблоками, являются: меньшая плотность и теплопроводность в сухом состоянии, а также меньшая стоимость. Последний фактор является решающим в настоящее время в большинстве случаев при выборе строительных материалов, несмотря на то, что блоки из ячеистого газобетона обладают низкой прочностью, высокой сорбционной влажностью (для марок D500-800 до 18–22 %), усадкой, малой прочностью — 2,5–3,5 МПа. Низкая прочность блоков из газобетона позволяет использовать их только для одно- и двухэтажного строительства с устройством монолитных поясов или для ограждающих самонесущих стен при каркасном строительстве, при этом обязательным является усиление поверхностного слоя блоков путем нанесения прочных штукатурных растворов. Керамические камни имеют очень низкую гигроскопичную влажность, не обладают усадкой, им не опасно замокание, они обладают существенно большей прочностью, что позволяет возводить из них многоэтажные здания — до 10 этажей. Высокая морозостойкость позволяет использовать их как лицевые стеновые материалы без нанесения штукатурных растворов. Анализ конкурентных преимуществ газоблоков и керамоблоков позволил сформулировать основные задачи для производителей стеновой керамики для повышения востребованности продукции на рынке:

– снижение теплопроводности изделий до 0,10 Вт/(м·°С) при сохранении марки по прочности не ниже М100;

– снижение стоимости реализации изделий до 8–10 рублей за условную единицу в пересчете на объем стандартного кирпича (250 x 120 x 65 мм).

В настоящее время стоимость реализации керамических камней (блоков) Славянского кирпичного завода, единственного по выпуску данных изделий на юге России, составляет 130 рублей за блок формата 10,8НФ, что в пересчете на один кирпич стандартного размера составляет 12 рублей.

Для достижения поставленной задачи по успешной конкуренции с газоблоками и достижения высокой экономической эффективности производства, себестоимость керамоблоков должна составлять в пересчете на один условный кирпич до 5–6 рублей, т.е. затраты на производство 1 блока формата 10,8НФ не должны превышать 65 рублей. Данный параметр достижим при строительстве нового или реконструкции существующего завода с учетом следующих факторов:

– организация производства должна осуществляться на готовой производственной площадке с подведенными внешними сетями или на действующем кирпичном заводе с выработанным ресурсом посредством его реконструкции;

– сырьевые материалы должны иметь минимальную стоимость, гибкие технологические свойства и находиться в непосредственной близости от завода;

– технологическая схема производства должна быть упрощенной с минимальным количеством массоподготовительного оборудования, технологических переделов и укладкой сырцовых изделий сразу на обжиговые вагонетки для сушки и обжига;

– затраты на обжиг должны быть минимальные. Достичь этого можно без использования газа, с применением в качестве топливно-выгорающей добавки отходов углеобогащения и продуктов переработки терриконов Восточного Донбасса с определенными характеристиками.

Проведя многофакторный анализ, нами установлено, что решить задачу по организации производства керамических камней с минимальной себестоимостью возможно с использованием опал-кристобалитовых опоковидных пород, широко распространенных в Ростовской области и других регионах юга России. Тонкопористая камневидная структура пород и аморфный опаловый кремнезем, являющийся основной составляющей опал-кристобалитовых пород, а также полное выгорание угольной составляющей, обеспечивают существенное снижение теплопроводности керамики на их основе, а особые керамические дообжиговые и обжиговые свойства позволяют разработать эффективную технологическую линию с минимальными производственными затратами [8–12].

Материалы и методы. Основные методы исследования дообжиговых и обжиговых свойств опоковидных пород, используемые приборы и оборудование представлены на рис. 1.

Пробы опал-кристобалитовых опоковидных пород для проведения исследований отбирались на известных месторождениях юга России лично авторами данной публикации.



Рис. 1. Методы изучения опоковидных пород для производства на их основе крупноформатных керамических камней

Представительные лабораторно-технологические пробы формировались из точечных проб путем их объединения и квартования. Для изучения и подтверждения химико-минералогического состава и структурных особенностей опоковидных опал-кристобалитовых пород применялись общепринятые методики и современные методы исследований, которые проводились в центрах коллективного пользования Донского государственного технического университета и Южного федерального университета. Технологические исследования керамических свойств проводились на сырьевых смесях различного зернового состава по общепринятым в технологии керамики методикам испытаний.

Результаты исследования. Опоковидные породы отличаются большим разнообразием состава, в зависимости от которого выделяются различные литологические разновидности (таблица 1): от опок малоглинистых с максимальным содержанием аморфного кремнезема до опок высококарбонатных и смешанных глинисто-карбонатных пород.

Для производства изделий стеновой керамики наиболее пригодными являются опоки среднеглинистые и глинистые с содержанием карбонатной составляющей до 20 %. Общим для всех видов опок является камневидная структура, микропористость и то, что глинистые минералы, преимущественно гидрослюды, находятся в прочном контакте с опаловым кремнеземом (рис. 2) и, несмотря на достаточно высокое их содержание в естественном состоянии, не проявляют своих пластических свойств. Камневидная структура предопределяет, что помимо минерального состава и технологических факторов, на дообжиговые и обжиговые свойства данного сырья существенное влияние оказывает степень его измельчения. С увеличением степени измельчения возрастает пластичность формовочных масс, воздушная и огневая усадка, степень спекаемости, прочность обожженных образцов.

Причем, пластичность формовочных масс резко возрастает при преобладании в зерновом составе фракции менее 0,05 мм, что связано с «высвобождением» глинистых минералов от контакта с опалом.

Таблица 1

Классификация опоковидных пород по вещественному составу как сырья для стеновой керамики

Вид опоки	Содержание компонентов, % по массе		
	$SiO_{2\ общ.}$ $SiO_{2\ опал.}$	Глинистые минералы	Карбонатный компонент
Опока малоглинистая	75-90 60-70	10-20	до 5
Опока среднеглинистая	60-80 40-60	20-35	до 5
Опока глинистая (глина кремнистая)	45-65 35-45	35-50	до 5
Опока малоглинистая карбонатная	60-85 40-60	10-20	5-20
Опока карбонатная среднеглинистая	45-75 30-40	20-35	5-20
Опока карбонатная глинистая	30-60 20-30	35-50	5-20
Опока малоглинистая высококарбонатная	45-70 30-40	10-20	20-35
Опока среднеглинистая высококарбонатная	30-60 20-40	20-35	20-35
Смешанная опоковидно-высокарбонатно-глинистая порода	15-45 20-30	35-50	20-35

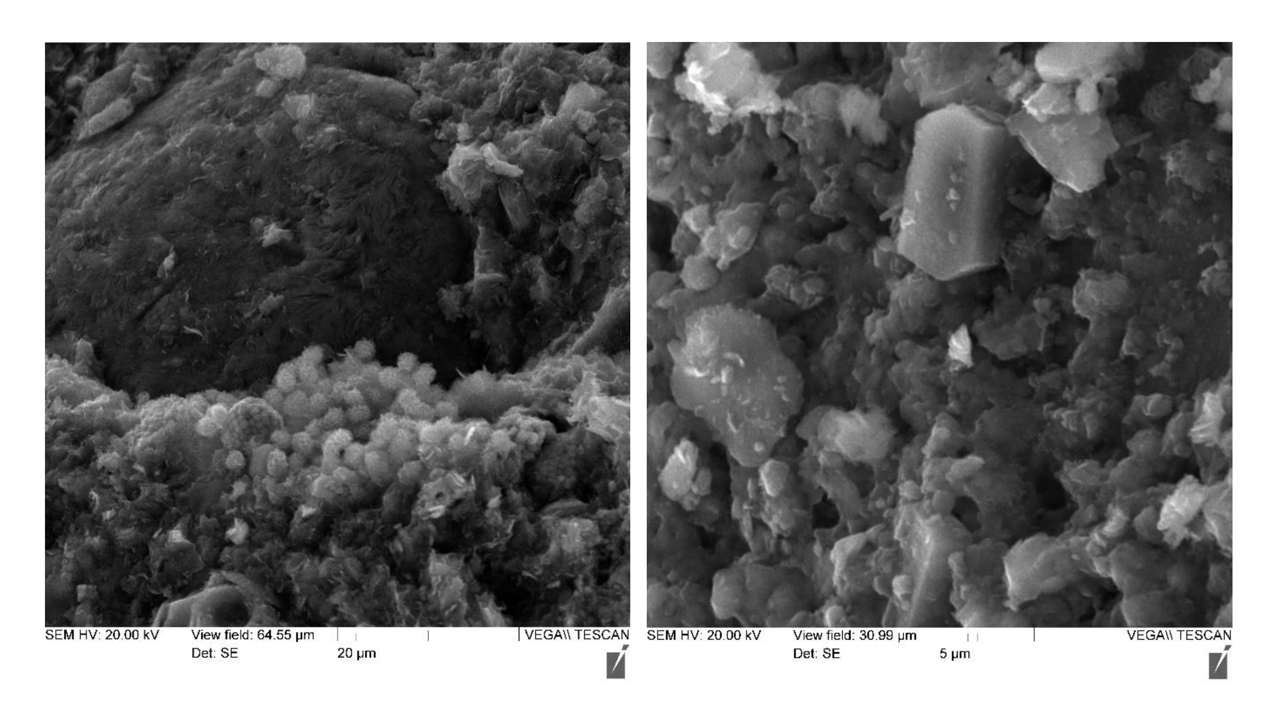


Рис. 2. Глинистые минералы в опоках листоватой и игольчатой формы в контакте с опаловым кремнеземом глобулярной формы (Шахтинское месторождение)

На рис. 3 и 4 для примера показаны зависимости плотности и прочности обожженных образцов на основе опок Шахтинского месторождения от зернового состава сырьевых масс и температуры обжига.

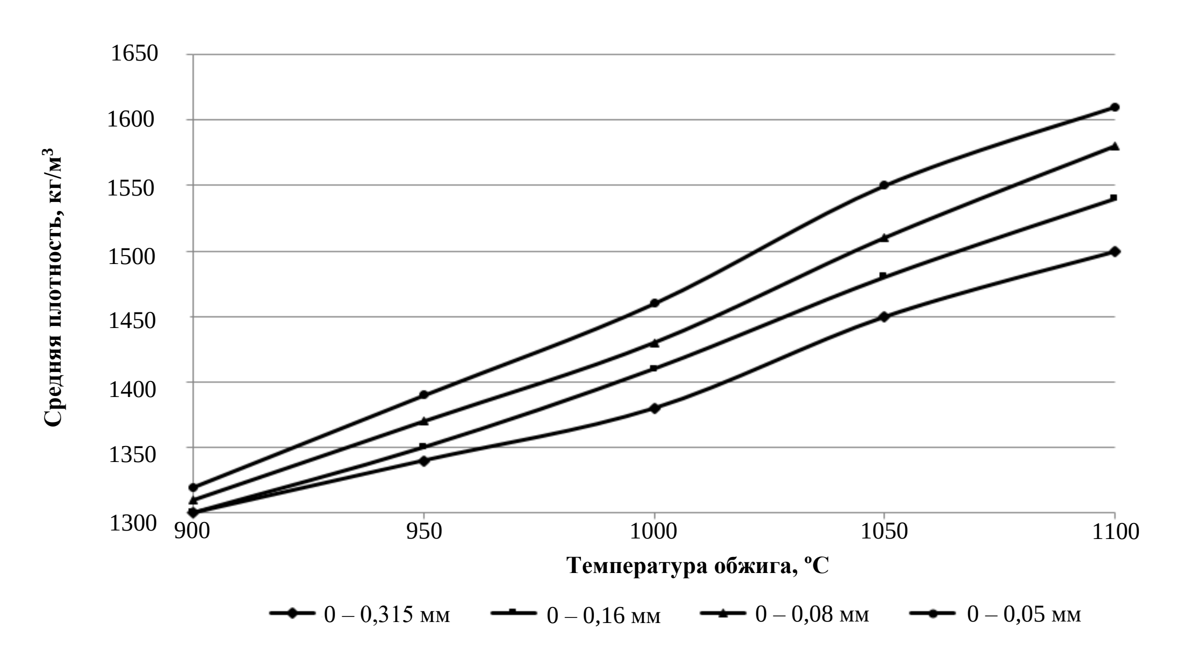


Рис. 3. Зависимость плотности обожженных образцов от зернового состава сырьевой смеси и температуры обжига

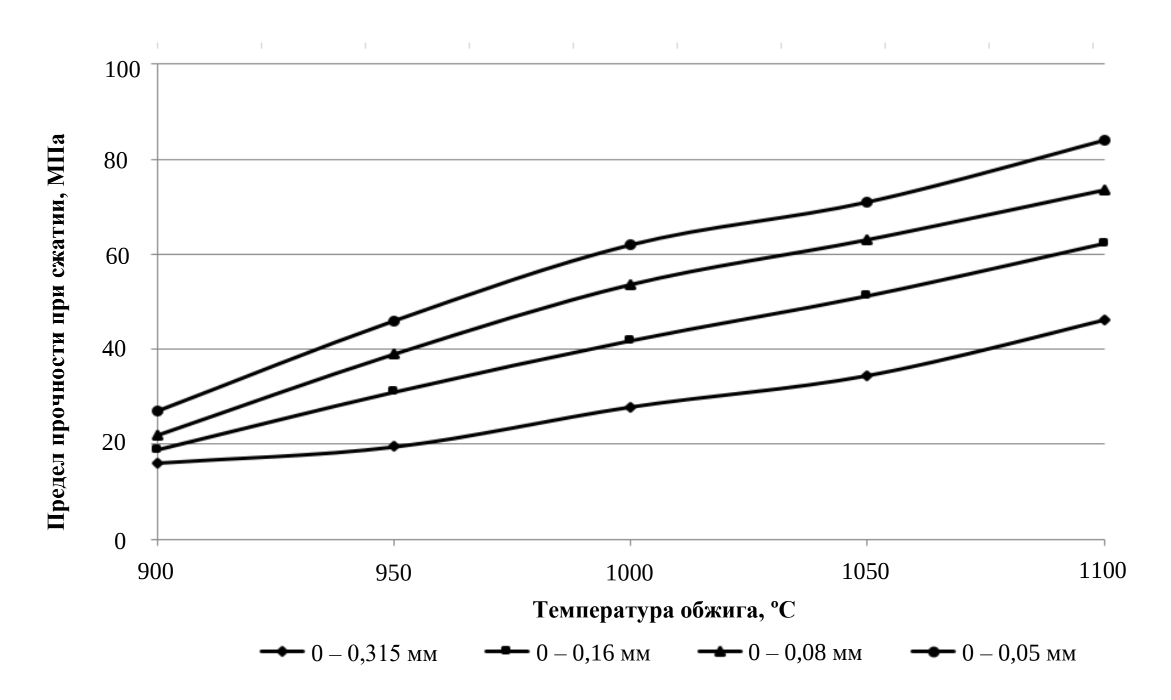


Рис. 4. Зависимость предела прочности при сжатии обожженных образцов от зернового состава сырьевой смеси и температуры обжига

Как видно из результатов экспериментов, обожженные образцы на основе опок обладают достаточной прочностью для стеновой керамики: от 27,9 до 62 МПа при температуре обжига 1000 °С и измельчении материала до фракций от 0–0,315 мм до 0–0,05 мм и от 34,5 до 71 МПа при температуре обжига 1050 °С и таком же измельчении. Особенностью обожженных образцов на основе опок является пониженная на 15–20 %, в сравнении с глинистым сырьем, плотность: от 1380 до 1460 кг/м^3 при температуре обжига 1000 °С и измельчении материала до фракций от 0–0,315 до 0–0,05 мм и от 1450 до 1560 1460 кг/м^3 при температуре обжига 1050 °С и таком же измельчении. Пониженная плотность керамики на основе опок объясняется частичным сохранением природной микропористости опок, что совместно с аморфной структурой опалового кремнезема приводит к существенному снижению теплопроводности материала.

Одним из существенных факторов снижения себестоимости производства изделий является снижение затрат на обжиг. Достичь этого можно, используя отходы углеобогащения и продукты переработки терриконников в качестве топливно-выгорающей добавки без использования природного газа или используя его в минимальном количестве только для поддержки горения. Результаты наших исследований и других авторов, проведенные ранее, показали, что наиболее целесообразным для этих целей является использование мелкофракционных материалов (например,

угольного кека) с преимущественным размером зерен от 0,5 до 2,0 мм, в которых содержание угольного компонента составляет 30–50 % [13–14]. Для полного обжига изделий стеновой керамики количество угля с калорийностью около 8000 ккал/кг должно составлять 8 % от массы изделий. Таким образом, количество угольного кека в составе сырьевой смеси должно быть 15–20 %. С экономической точки зрения использовать угольный кек для обжига керамического кирпича и камней очень привлекательно, так как при стоимости угольного кека 300 рублей за тонну, стоимость единицы выделяемого тепла при его горении на порядок ниже, в сравнении с газом и чистым углем. Однако ввод в состав сырьевой смеси угольного кека приводит к снижению плотности и прочности обожженного керамического материала, которая для получения крупноформатных керамических блоков с пустотностью около 50 % должна быть не ниже 30 МПа. Эксперименты, проводимые нами, показали, что ввод угольного кека с содержанием угля около 50 % в количестве до 15–20 % приводит к снижению плотности образцов примерно на 7–9 %, а прочности до 30 %.

На рис. 5 и 6 для примера показаны зависимости прочности и плотности образцов от количества вводимого угольного кека и зернового состава сырьевой смеси при температуре обжига 1050 °C и продолжительности обжига 22 часа. Следует отметить, что ввод угольного кека в количестве 15 % обеспечивает 90–95 % топлива, необходимого для обжига. При вводе 20 % угольного кека будет наблюдаться избыток тепла, которое можно отводить для сушки изделий.

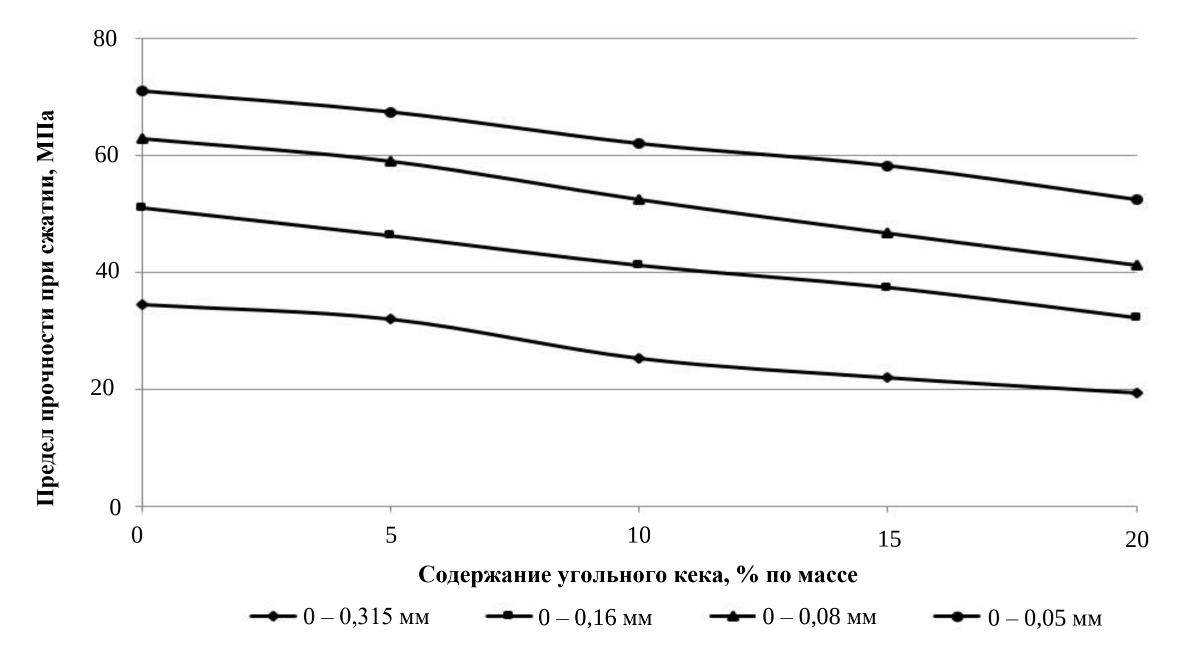


Рис. 5. Зависимость предела прочности при сжатии обожженных образцов от зернового состава сырьевой смеси и количества угольного кека

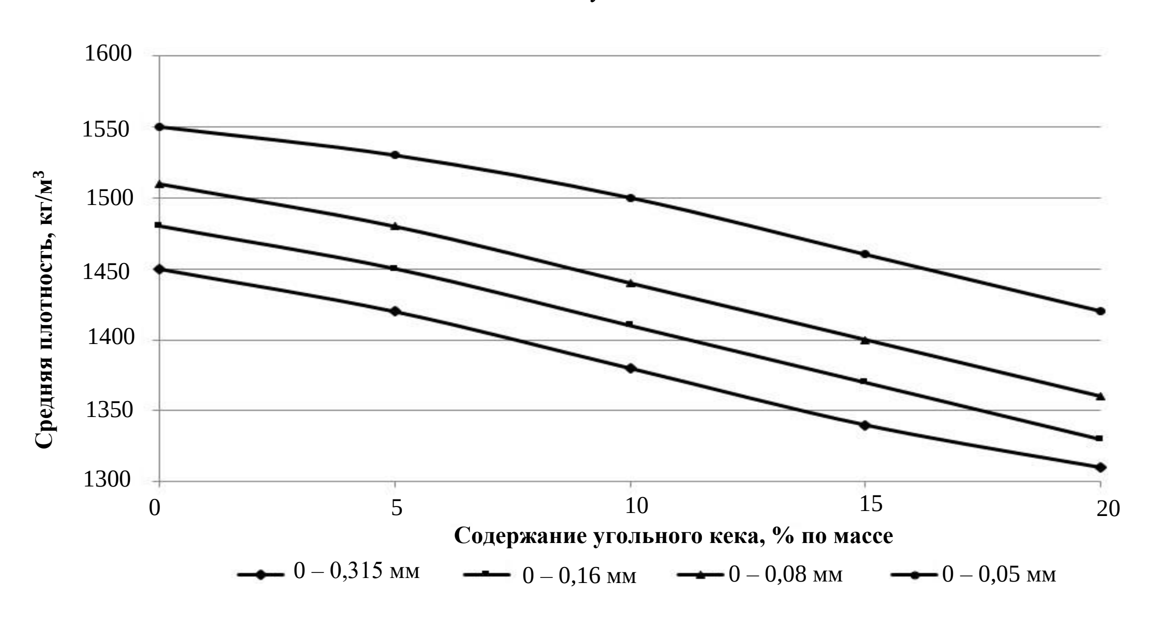


Рис. 6. Зависимость плотности обожженных образцов от зернового состава сырьевой смеси и количества угольного кека ($T_{обж.}$ 1050 °C)

Как видно, необходимая прочность выше 30 МПа, при содержании угольного кека 15–20 % и температуре обжига 1050 °С, достигается только для зерновых составов 0–0,16 мм и тоньше. При этом плотность обожженных образцов составляет 1370–1420 кг/м^3. Более тонкое измельчение сырьевой смеси будет приводить к повышенным энергозатратам. Поэтому оптимальными параметрами можно считать измельчение сырьевой смеси до фракции 0–0,16 мм и обжиг при температуре 1050 °С. Однако следует отметить, что для опок, как камневидного сырья, степень измельчения сырьевой смеси и температура обжига являются двумя взаимосвязанными факторами: можно снизить температуру обжига и увеличить степень измельчения и наоборот. В нашем случае, можно измельчать сырьевую смесь до фракции 0–0,08 мм и обжигать при температуре 1000 °С.

При данной плотности керамического черепка, его теплопроводность, за счет высокой микропористости и наличия в большом количестве аморфной составляющей в виде опалового кремнезема, по нашим расчетным данным и данным наших экспериментальных работ и работ других исследователей составляет 0,30–0,34 Вт/(м·°С) [15]. При данных показателях гарантирована возможность производства крупноформатных керамических блоков с пустотностью 50–55 %, теплопроводностью 0,09–0,12 Вт/(м·°С) и пределом прочности при сжатии 10–15 МПа. Данные показатели превосходят показатели блоков из автоклавного ячеистого бетона (газоблоков) и являются конкурентным преимуществом на рынке стеновых материалов для промышленного и гражданского строительства.

Полученные нами данные позволили разработать оптимальную технологическую схему, позволяющую выпускать изделия с минимальной себестоимостью. Основными принципами данной схемы являются следующие технологические решения:

– массоподготовка включает два основных вида оборудования;

– формование изделий осуществляется способом полужесткой экструзии с садкой изделий непосредственно на обжиговые вагонетки;

– в качестве топлива используются побочные продукты переработки террикоников в виде угольного кека с зольностью около 50 % и зерновым составом 0,5–2,0 мм.

На рис. 7 представлена технологическая схема производства с указанием основных операций и вида используемого оборудования без привязки к конкретной производительности предприятия, так как один и тот же вид оборудования может иметь различную производительность.

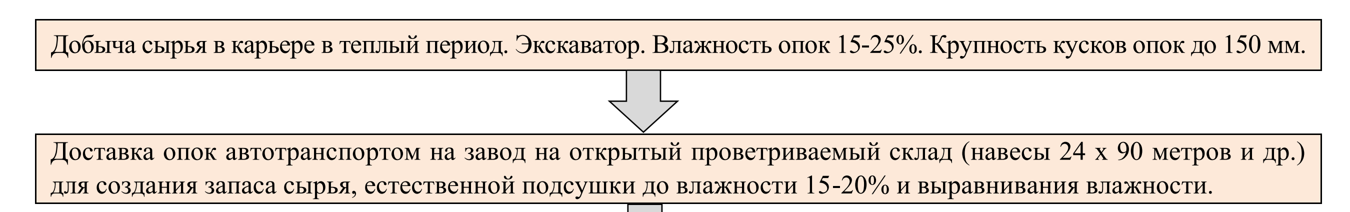


Рис. 7. Технологическая схема производства керамических камней на основе опок и угольного кека

Учитывая высокую трещиноватость опоковидных пород, их разработка в карьере может вестись обычными экскаваторами традиционным способом без буровзрывных работ. Ожидаемая крупность кусков по опыту существующих карьеров будет составлять не более 150 мм. После добычи опоки автотранспортом доставляются на склад сырья, представляющий собой открытые со всех сторон заасфальтированные площадки под навесами различных размеров.

Под одним таким навесом с размерами 24 на 90 метров и высотой 6 метров при высоте бурта 4–5 метров может храниться 8–10 тысяч кубов сырья. Четыре таких навеса вполне могут обеспечить запас сырья на год для завода производительностью 30 млн. штук в год в пересчете на условный кирпич. Хранение под навесами обеспечивает подсушку сырья, что существенно ускоряет его переработку и снижает энергозатраты. Кроме того, в зависимости от погодных условий, погрузчик может отбирать сырье с любой стороны, где оно более сухое.

Со склада сырья с помощью погрузчика опока поступает в приемный бункер, оснащенный питателем. Его размеры подбираются в зависимости от производительности завода. Он может располагаться под навесом, примыкающим к корпусу массоподготовки, и пыль не будет попадать в цех массоподготовки. Далее по системе конвейеров сырье попадает для измельчения на специальную молотковую дробилку для камневидного глинистого сырья, оснащенную системой подогрева отбойника и разработанную специально для малопрочных пород, обладающих малой пластичностью. При определенных настройках такая дробилка на выходе выдает зерновой состав менее 1 мм с преимущественным содержанием тонких фракций менее 50 мкм. В данной дробилке совмещены ударный, раздавливающий и истирающий принципы измельчения, для получения порошка с тонким зерновым составом (рис. 8). Зерновой состав порошка может изменяться в зависимости от настройки данного оборудования. Проводимые нами эксперименты в заводских условиях позволили получить необходимый зерновой состав порошка, представленный в таблице 2, после однократного измельчения.

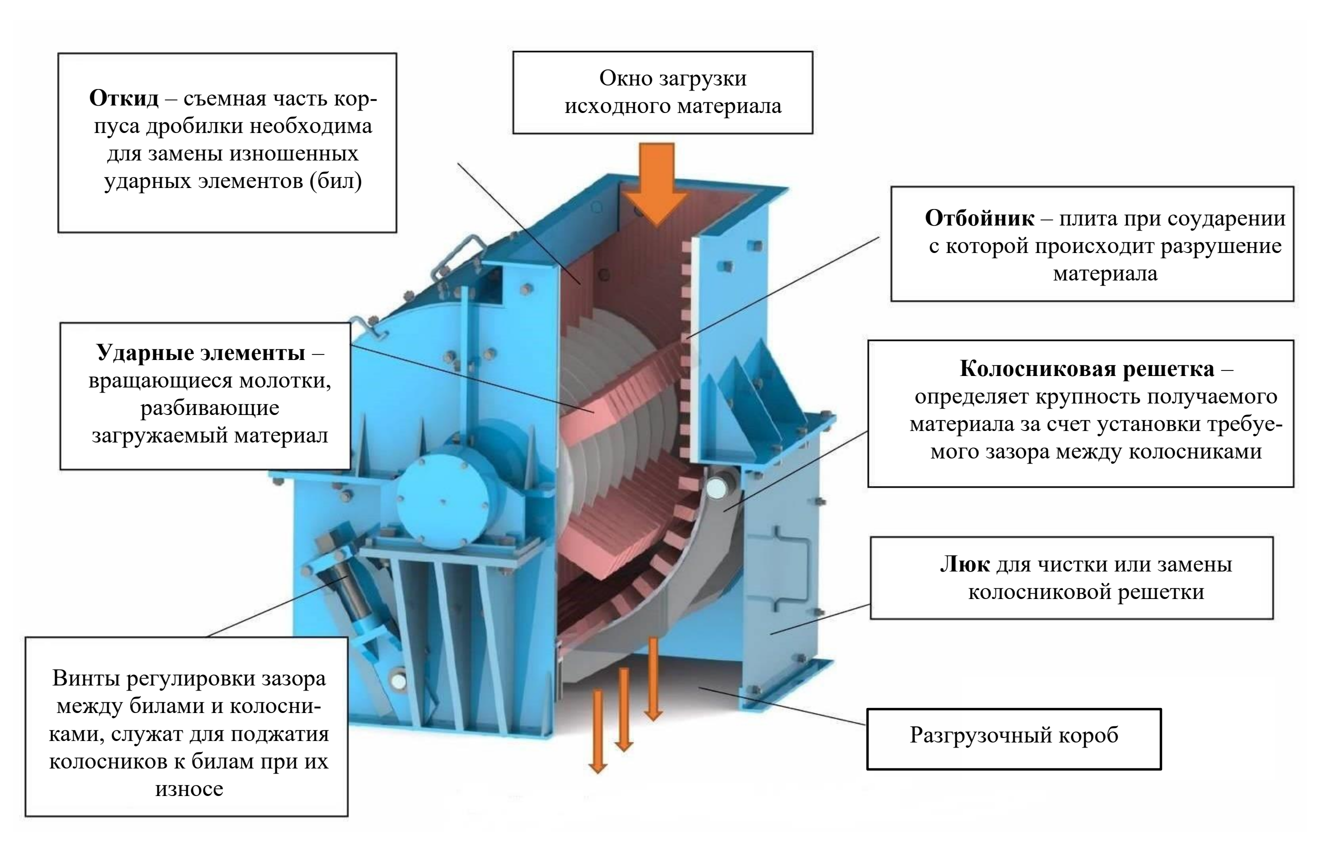


Рис. 8. Молотковая дробилка в открытом виде для камневидного опоковидного сырья

После измельчения порошок по системе шнековых транспортеров подается в бункер-запасник объемом, достаточным для 1 смены работы линии формования. Для завода производительностью 30 млн. штук условного кирпича в год объем бункера-запасника составляет около 100 м^3. Сменный запас измельченного сырья позволяет проводить профилактические работы участка массоподготовки без остановки последующих технологических переделов.

Таблица 2

Зерновой состав измельченных опок после однократного измельчения

Фракция, мм						
Более 1,25	0,63–1,25	0,315–0,63	0,16–0,315	0,08–0,16	0,05–0,05	Менее 0,05
1,23	5,62	6,43	16,14	13,58	5,92	51,08

После бункера-запасника порошок по системе конвейров попадает в трехвальный смеситель, в котором производится ввод угольного кека от отдельного питателя, увлажение массы до формовочной влажности (для опок это 25–30 %) и тщательное перемешивание. После смесителя формовочная масса попадает в бункер-накопитель объемом, достаточным для 1 смены работы формующего пресса. Сменный запас формовочной массы позволяет проводить профилактические работы участка массоподготовки без остановки последующих технологических переделов.

Подготовленная шихта подается на вакуум-пресс, состоящий из 2-х частей: смеситель, в который поступает формовочная масса, вакуумная камера с водокольцевым насосом и, собственно, экструдер. Смеситель производит окончательное усреднение шихты и ее доувлажнение при необходимости. Далее усредненная и увлажненная масса подается в экструдер, где при давлении в головке пресса 2–3 МПа формуется брус, который автоматическим резаком разрезается на отдельные изделия, которые, в свою очередь, группируются в комплекты и роботом-садчиком укладываются на обжиговые вагонетки в ряды, высотой 1,1 метра (пять изделий с толщиной 219 мм).

Учитывая малую чувствительность опок к сушке, подсушка изделий производится сначала на обжиговых вагонетках в естественных условиях на обводных путях участка сушки и обжига в течение 24 часов, а затем в туннельной сушилке в течение 24 часов**.**

Учитывая высокую пустотность изделий и высокую газопроницаемость сырьевых смесей на основе опок, обжиг производится по ускоренному режиму в туннельной печи с автоматической регулировкой газовой среды и температуры в течение 24 часов. Постоянный тепловой поток пересекает туннель по всей длине в направлении, противоположном перемещению изделий. Это обеспечивает теплообмен от выхода к входу вагонеток через зоны подогрева, обжига и охлаждения.

В зоне подогрева горячие газы от сгорания угля, циркулирующие через изделия, нагревают их, при этом сами охлаждаются перед удалением в дымовую трубу (при 150 °C происходит досушка изделий). При температуре около 600–700 °C происходит самовозгорание угля и начинается обжиг изделий. При максимальной температуре осуществляется выдержка в течение трех часов. Это необходимо для получения равномерной температуры в пакетах керамических камней (максимальная температура выдержки — 1050 °C). В зоне охлаждения поток воздуха из окружающей среды всасывается со стороны выхода печи, проходит через изделия, охлаждая их, и сам при этом нагревается. Изделия охлаждаются до 100 °C при выходе из печи.

Из печи транспортером вагонетка с изделиями подается на рабочий путь, по которому посредством тягового механизма перемещается на разгрузку. Вагонетка с обожженными изделиями подается к порталу, поворотная головка которого послойно разгружает керамоблок и укладывает его на транспортер, где производится укладка на поддоны. Поддон обвязывается полиэтиленовой лентой посредством упаковочной машины. После чего изделия на поддонах электропогрузчиком с вилочным захватом перемещаются на склад готовой продукции.

Обсуждение и заключение. Проведенные исследования подтвердили дообжиговые технологические свойства опок и их отличия от традиционного размокаемого в воде глинистого сырья: повышенная формовочная влажность, небольшая воздушная усадка, малая чувствительность к сушке. Установлены зависимости плотности и прочности образцов от степени измельчения опок, температуры обжига и количества угольного кека в составе сырьевой смеси. Определено влияние отходов углеобогащения и их оптимальное количество на физико-механические свойства обожженных образцов. Ввод угольного кека с содержанием угля 50 % в количестве 15–20 % позволяет исключить использование газа для обжига или использовать его в минимальном объеме на реконструируемых заводах. На основе полученных результатов разработана упрощенная технологическая схема производства крупноформатных камней с их минимальной себестоимостью. Предлагаемая технологическая схема состоит из двух единиц основного массоподготовительного оборудования — молотковой дробилки и трехвального смесителя, формование изделий осуществляется способом полужесткой экструзии, сушка изделий производится непосредственно на обжиговых вагонетках, а для обжига по ускоренному режиму с минимальным расходом газа используется угольный кек, который вводится в состав сырьевой смеси. Предложенные составы масс на основе

опок и угольного кека и технологические решения позволят получать керамические блоки с низкой теплопроводностью — 0,09–0,12 Вт/(м·°С), средней плотностью 650–800 кг/м^3, при этом прочность при сжатии составит 10–15 МПа. Произведенные расчеты показали, что себестоимость крупноформатных керамических камней на основе опок с применением угольного кека будет составлять 3000–3500 рублей за кубометр изделий, что позволит керамическим камням конкурировать с газоблоками не только в техническом плане, но и в экономическом.

Ростовская область, обладающая огромными запасами опоковидных пород и большими невостребованными запасами техногенного угольного сырья, может стать центром производства высококачественных крупноформатных керамических камней с низкой стоимостью и обеспечить юг и центральную часть страны высококачественными стеновыми материалами.

Список литературы

1. Салахов А.М. Керамика для строителей и архитекторов. Казань: Парадигма; 2009. 296 с.
2. Божко Ю.А., Котляр В.Д., Рогочая М.В. Сравнительная эффективность применения в строительстве стеновых изделий плотностью менее 800 кг/м^3. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия.* 2015;(4):46–51. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnaya-effektivnost-primeneniya-v-stroitelstve-stenovyh-izdeliy-plotnostyu-menee-800-kg-m3 (дата обращения: 01.07.2023).
3. Рубцов О.И., Боброва Е.Ю., Жуков А.Д., Зиновьева Е.А. Керамический кирпич, камни и полнокирпичные стены. *Строительные материалы.* 2019;(9):8–13. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13
4. *Анализ рынка керамического поризованного камня (кирпича, блоков) в России:* Аналитический отчет DISCOVERY RESEARCH GROUP. Москва: Агентство маркетинговых исследований Discovery research group. 2022. 44 с.
5. Трушин Г. Дом из керамоблоков: плюсы и минусы строительства. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.* 2023;3:33−35.
6. Малиновская М.И. Оценка эффективности применения строительных материалов для наружных ограждающих стеновых конструкций. *Тенденции развития науки и образования*. 2022;(92-15):53−55. https://doi.org/10.18411/trnio-12-2022-692
7. Семенов А.А. Итоги развития российского рынка стеновых материалов в 2021 г. *Строительные материалы.* 2022;(3):44–45. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-800-3-44-45
8. Котляр В.Д., Терехина Ю.В. Минералого-химические и структурные особенности опоковидных опал-кристобалитовых пород как сырья для стройиндустрии. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* 2023;334(1):145−155. https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/3852
9. Котляр В.Д., Терехина Ю.В. Классификационные признаки и особенности опал-кристобалитовых опоковидных пород как сырья для стеновой керамики. *Строительные материалы.* 2022;(4):25–30. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-801-4-25-30
10. Талпа Б.В. Перспективы развития минерально-сырьевой базы для производства светложгущейся стеновой керамики на Юге России. *Строительные материалы.* 2014;(4):20–23. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-mineralno-syrievoy-bazy-dlya-proizvodstva-svetlozhguscheysya-stenovoy-keramiki-na-yuge-rossii (дата обращения: 05.07.2023).
11. Aïtcin P.C. Supplementary Cementitious Materials and Blended Cements. *Science and Technology of Concrete Admixtures.* 2016:53–73. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00004-7
12. Fröhlich F. The Opal-CT Nanostructure. *Journal of Non-Crystalline Solids.* 2020;533:119938. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119938
13. Fomina O.A., Stoboushkin A.Y. Modeling of the Transition Layer in Ceramic Matrix Composites from Coal Wastes and Clay. *Solid State Phenomena.* 2020;299:37–42. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.37
14. Gaishun E., Yavruyan K., Kotlyar V., Lotoshnikova E. Raw Materials in East Donbass Based on Waste Piles Processing Screenings for the Large-sized Ceramic Stones' Production. *Materials Science Forum.* 2020;1011:116–122. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1011.116
15. Пастушков П.П., Павленко Н.В., Смирнов С.И. Исследования влияния различных факторов на теплопроводность крупноформатных керамических камней. *Строительные материалы.* 2023;(5):53–57. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-53-57

References

1. Salakhov AM. *Ceramics for Builders and Architects.* Kazan: Paradigma; 2009. 296 p. (In Russ.).
2. Bozhko UA, Kotlyar VD, Rogochaya MV. Comparative Efficiency of Application in the Construction of Wall Products with Density Less Than 800 kg/m^3. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region.*

2015;(4):46–51. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnaya-effektivnost-primeneniya-v-stroitelstve-stenovyh-izdeliy-plotnostyu-menee-800-kg-m3 (accessed: 02.07.2023).

3. Rubtsov OI, Bobrova EYu, Zhukov AD, Zinov'eva EA. Ceramic Brick, Stones and the Full Brick Walls. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials].* 2019;(9):8–13. (In Russ.). https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13

4. *Analysis of the Russian Market of Ceramic Porous Stone (Bricks, Blocks): Analytical Report DISCOVERY RESEARCH GROUP*. Moscow: Marketing Research Agency DISCOVERY RESEARCH GROUP; 2022. 44 p.

5. Trushin G. House of Ceramic Blocks: Pros and Cons of Construction. *Stroitel'nye Materialy, Oborudovanie, Tekhnologii XXI Veka.* 2023;3:33−35. (In Russ.).

6. Malinovskaya MI. Evaluation of Efficiency of Construction Materials Application for External Enclosing Wall Structures. *Tendencii Razvitiya Nauki i Obrazovaniya.* 2022;(92-15):53−55. (In Russ.). https://doi.org/10.18411/trnio-12-2022-692

7. Semenov AA. Results of the Development of the Russian Wall Materials Market in 2021. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials].* 2022;(3):44–45. (In Russ.). https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-800-3-44-45

8. Kotlyar VD, Terekhina YuV. Mineral-chemical and Structural Features of Opokamorphic Opal-Cristobalite Rocks as Raw Material for the Construction Industry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2023;334(1):145−155. (In Russ.). https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/3852

9. Kotlyar VD, Terekhina YV. Classification Features and Peculiarities of Opal-Cristobalite Opoka-Like Rocks as Raw Materials for Wall Ceramics. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials].* 2022;(4):25–30. (In Russ.). https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-801-4-25-30

10. Talpa BV. Prospects of Development of Mineral-Raw Material Base for Manufacture of Wall Ceramics Becoming Light Color after Burning in the South of Russia. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials].* 2014;(4):20–23. (In Russ.). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-mineralno-syrievoy-bazy-dlya-proizvodstva-svetlozhguscheysya-stenovoy-keramiki-na-yuge-rossii (accessed: 05.07.2023).

11. Aïtcin PC. Supplementary Cementitious Materials and Blended Cements. *Science and Technology of Concrete Admixtures.* 2016:53–73. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00004-7

12. Fröhlich F. The Opal-CT Nanostructure. *Journal of Non-Crystalline Solids.* 2020;533:119938. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119938

13. Fomina OA, Stoboushkin AY. Modeling of the Transition Layer in Ceramic Matrix Composites from Coal Wastes and Clay. *Solid State Phenomena.* 2020;299:37–42. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.37

14. Gaishun E, Yavruyan K, Kotlyar V, Lotoshnikova E. Raw Materials in East Donbass Based on Waste Piles Processing Screenings for the Large-sized Ceramic Stones' Production. *Materials Science Forum.* 2020;1011:116–122. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1011.116

15. Pastushkov PP, Pavlenko NV, Smirnov SI. Research of the Influence of Various Factors on the Thermal Conductivity of Large-Format Vertically Perforated Clay Blocks. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials].* 2023;(5):53–57. (In Russ.). https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-53-57

Поступила в редакцию 20.08.2023
Поступила после рецензирования 03.09.2023
Принята к публикации 16.09.2023

Об авторах:

Котляр Владимир Дмитриевич, заведующий кафедрой «Строительные материалы» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: AAG-9437-2021, ScopusID, ORCID, diatomit_kvd@mail.ru

Терёхина Юлия Викторовна, старший преподаватель кафедры «Строительные материалы» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ResearcherID: AAG-9447-2021, ScopusID, ORCID, yuliya-2209@mail.ru

Лапунова Кира Алексеевна, доцент кафедры «Строительные материалы» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ScopusID, ORCID, keramik_kira@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Котляр В.Д. — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, формулировка выводов по исследованиям.

Терёхина Ю.В. — детальное планирование, организация и реализация исследований, обработка и анализ результатов исследований, подготовка текста.

Лапунова К.А. — анализ результатов исследований, доработка текста, графическое оформление результатов исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 20.08.2023
Revised 03.09.2023
Accepted 16.09.2023

About the Authors:

Vladimir D. Kotlyar, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Building Materials Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID: AAG-9437-2021, ScopusID, ORCID, diatomit_kvd@mail.ru

Yuliya V. Terekhina, Senior Lecturer of the Building Materials Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID: AAG-9447-2021, ScopusID, ORCID, yuliya-2209@mail.ru

Kira A. Lapunova, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Building Materials Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ORCID, keramik_kira@mail.ru

Claimed contributorship:

Kotlyar VD — formalating of the main concept, aims and objectives of the study, formulating the conclusions of the research.

Terekhina YV — detailed planning, organisation and implementation of research, processing and analysis of research results, preparation of text.

Lapunova KA — analysis of research results, text revision, graphical design of research results.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ





УДК 691.32

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-59-68

Прогноз кинетики прочности бетона при твердении в условиях, отличных от нормальных

Г.В. Несветаев ✉, **Ю.И. Корянова** 



Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ nesgrin@yandex.ru

Аннотация

Введение. При возведении массивных монолитных железобетонных конструкций твердение бетона происходит в нестационарных температурных условиях, отличных от нормальных, что оказывает наряду с показателем массивности конструкции и рецептурными особенностями бетонов значительное влияние на кинетику прочности бетона. Следствием неоднородности температурного поля является различие прочностных и деформационных показателей твердеющего бетона в разных точках конструкции в одно и то же время, в итоге формируется неоднородное поле уровня напряжений. В связи с недостаточным объемом публикаций по вопросу прогнозирования прочности бетона в зависимости от времени и температурных условий твердения бетонов с учетом их рецептурных особенностей, исследования в данной области представляют актуальную задачу, исходя из чего целью работы является получение математической зависимости кинетики прочности различных бетонов от показателя приведенного времени твердения, необходимой для расчета термонапряженного состояния в ранний период твердения в нестационарных температурных условиях массивных железобетонных конструкций.

Материалы и методы. Использованы экспериментальные и расчетные данные авторов, а также результаты, представленные в опубликованных работах и нормативных документах. Произведена теоретическая оценка кинетики прочности бетонов в зависимости от типа цемента по кинетике твердения с учетом фактического тепловыделения твердеющего бетона и его температуры, в т. ч. нестационарной, основанная на следующих положениях: кинетика тепловыделения цемента может рассматриваться как показатель степени гидратации цемента и нарастания прочности; степень гидратации цемента в момент времени определяет пористость цементного камня, а прочность цементного камня и бетона определяется его пористостью.

Результаты исследования. Получена зависимость относительной прочности бетона от показателя приведенного времени твердения в нестационарных температурных условиях для бетонов, различающихся кинетикой твердения в нормальных условиях. Показана хорошая сходимость предложенной зависимости с результатами экспериментальных исследований и некоторыми нормативными документами.

Обсуждение и заключение. Развиты научные представления об оценке относительной прочности бетона, твердеющего в температурных условиях, отличных от нормальных, на основе гипотезы о зависимости кинетики твердения бетона от кинетики тепловыделения цемента с учетом степени зрелости бетона к «приведенному времени твердения». Зависимость целесообразно использовать при расчетах термонапряженного состояния массивных монолитных железобетонных конструкций в ранний период твердения. Показана и обоснована эффективность оценки кинетики прочности различных бетонов, твердеющих в нестационарных температурных условиях, по показателю «приведенное время». При получении показателя учитывались кинетика тепловыделения и величина общей пористости, определенной через показатель степени гидратации. Обосновано использование «приведенного времени твердения» в зависимости от степени зрелости для оценки относительной прочности бетона с учетом его рецептурных особенностей.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, кинетика прочности, температурные условия твердения, кинетика тепловыделения, степень зрелости, пористость, рецептурные особенности бетона

Для цитирования. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И. Прогноз кинетики прочности бетона при твердении в условиях, отличных от нормальных. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):59–68. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-59-68

Original article

Forecasting the Strength Gaining Kinetics of the Concrete Hardening in the Abnormal Conditions

Grigory V. Nesvetaev ✉, **Yulia I. Koryanova**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ nesgrin@yandex.ru

Abstract

Introduction. During construction of the massive monolithic reinforced concrete structures, concrete hardening takes place in the unsteady abnormal temperature conditions, which, along with the massiveness of the structure and concrete recipe features, influence significantly on the concrete strength gaining kinetics. The non-homogeneity of the temperature field leads to the difference of the hardening concrete strength and deformation indicators in the different points of a structure at one and the same time, eventually resulting in formation of the non-homogeneous stress field. Due to the insufficient number of publications dedicated to the topic of forecasting the dependence of the strength of concrete on the time and temperature conditions of its hardening and recipe features, the research in this field becomes a relevant objective. Thus, the aim of the work is to determine a mathematical dependence of the strength gaining kinetics of different concretes on the reduced time of hardening parameter, the dependence which is necessary for calculating the thermal stress of the massive reinforced concrete structures at early-age hardening in the unsteady temperature conditions.

Materials and Methods. The data received during the authors' experiments and calculations, as well as the data available in the existing publications and regulatory documents was used. Theoretical assessment of the concrete strength gaining kinetics, depending on the cement type hardening kinetics, was done. The assessment took into account the actual heat of hydration of the hardening concrete and its temperature, including the unsteady one, and was based on the following provisions: the kinetics of cement heat of hydration can be considered as the cement hydration degree and strength gaining indicator; the cement hydration degree in a given moment of time determines the porosity of a cement brick, and the strength of a cement brick and concrete is determined by the porosity thereof.

Results. The dependence of the relative strength of concrete on the reduced time of hardening parameter in the unsteady temperature conditions is determined for the concretes having different kinetics of hardening in the normal conditions. The good convergence of the proposed dependence with the results of experimental studies and some normative documents is shown.

Discussion and Conclusion. The scientific concepts on the relative strength assessment of the concrete, hardening in the abnormal temperature conditions, have been further developed based on the hypothesis of the concrete hardening kinetics dependence on the kinetics of cement heat of hydration, taking into account the degree of concrete aging per "reduced time of hardening". It's worth to use this dependence for calculating the thermal stress of the massive reinforced concrete structures at early-age hardening. The efficiency of assessing the strength gaining kinetics of the various concretes, hardening in the unsteady temperature conditions, by using the "reduced time" parameter, has been shown and substantiated. The heat of hydration kinetics and the total porosity magnitude, determined by the hydration degree indicator, have been taken into account. The application of the "reduced time of hardening", depending on the concrete aging degree to assess the relative strength of concrete, with regard to its recipe features, has been substantiated.

Keywords: reinforced concrete structures, strength gaining kinetics, hardening temperature, heat of hydration kinetics, aging degree, porosity, concrete recipe features

For citation. Nesvetaev GV, Koryanova YuI. Forecasting the Strength Gaining Kinetics of the Concrete Hardening in the Abnormal Conditions. *Modern Trends in Construction*, *Urban and Territory Planning.* 2023;2(4): 59–68. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-59-68

Введение. При возведении монолитных железобетонных конструкций твердение бетона происходит в условиях, отличных от нормальных, особенно это характерно для зимних условий или при бетонировании в жаркую погоду [1–3]. Помимо температурных условий внешней среды на температуру твердеющего бетона значительное влияние оказывает показатель массивности конструкций, температура в центре которых может превышать 50 °С при температуре среды менее 20 °С, причем с уменьшением показателя модуля массивности неравномерность температурного поля по сечению конструкции возрастает. Поскольку одним из ключевых вопросов технологического проектирования является определение времени достижения бетоном распалубочной и (или) критической прочности, от которого зависит, в частности, нормокомплект опалубки, сроки загружения конструкций и др., вопросы оценки кинетики прочности в зависимости от фактической температуры и рецептурных особенностей бетонов представляются актуальными [4, 5]. Создание производственной системы контроля, позволяющей при возведении монолитных конструкций управлять температурным режимом выдерживания и кинетикой твердения, является важным условием обеспечения качества работ [6].

Согласно СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции» значение критической прочности бетона без противоморозных добавок составляет в зависимости от условий выдерживания и класса бетона от 30 до 80 % от проектной, а распалубочной прочности — в зависимости от вида конструкции — до 80 %. Согласно СП 435.1325800.2018 «Конструкции бетонные и железобетонные монолитные» при разработке технологического регламента бетонирования определяется продолжительность ухода в зависимости от времени достижения критической прочности в конкретных условиях выдерживания. Закономерность нарастания прочности в зависимости от температурного режима выдерживания важна и с позиции предотвращения раннего трещинообразования массивных конструкций посредством регулирования температурно-усадочных напряжений, обусловленных собственными деформациями, с целью обеспечения их соответствия прочности бетона[1] [7], при этом важную роль играет кинетика тепловыделения бетона [8].

Как известно, температура твердения оказывает значительное влияние на кинетику прочности бетона, в связи с чем получение зависимости, позволяющей прогнозировать нарастание прочности бетона с учетом отличающихся от нормальных температурных условий представляет актуальную задачу. Заседателев И.Б и Шифрин С.А. в 1983 г. предложили метод прогнозирования прочности бетона, в т. ч. с химическими добавками, в раннем возрасте по пластической прочности смеси с учетом нестационарного режима твердения с использованием предложенной ими температурной функции. Необходимость определения эмпирического коэффициента перехода от пластической прочности смеси к прочности бетона усложняет метод прогнозирования. В [10] предложено мультипараметрическое уравнение для оценки относительной прочности бетона при зимнем бетонировании. В Р НОСТРОЙ 2.6.17-2016 «Производство бетонных работ в зимний период» и Р-НП СРО ССК-02-2015 «Рекомендации по производству бетонных работ в зимний период» рассматривается определение предела прочности бетона в зависимости от степени зрелости с переходом к эквивалентному времени выдерживания при 20 °С, но при этом, как и в [9], не учитываются кинетические особенности твердения бетонов на различных по темпу твердения цементах, в т. ч. с химическими добавками. В [10] представлен частный пример определения относительной прочности при прогреве конструкции греющими проводами в зависимости от температуры и продолжительности прогрева. В [11] рассматривается задача о формировании температурных полей и прочности бетона при прогреве греющими проводами без учета рецептурных особенностей твердеющего бетона. В [12] предложена зависимость относительной прочности бетона от показателя «зрелость бетона» $T{\cdot}\tau$, °С·ч, и средней температуры бетона T, °С, к моменту фиксируемого времени выдерживания τ, ч:

$$\frac{R_\tau}{R_{28}} = \exp\left(0{,}35\cdot\left(1 - \left(\frac{15800 - 122{,}5\cdot T}{T\cdot\tau}\right)^{0{,}55}\right)\right), \tag{1}$$

$$\mathrm{T} = \frac{\text{ЗБ}}{\tau}, \tag{2}$$

где ЗБ — показатель зрелости бетона, °С·ч, за время выдерживания τ, ч.

Данная зависимость также не учитывает влияния рецептурных факторов на кинетику твердения.

Таким образом, прогноз прочности бетона в зависимости от времени и температурных условий твердения бетонов с учетом их рецептурных особенностей представляет актуальную задачу, в связи с чем далее предложен и обоснован подход к оценке относительной прочности твердеющих в нестационарных температурных условиях бетонов, различающихся, в зависимости от рецептуры, кинетикой твердения в нормальных условиях.

[1] *Basis for and practical approaches to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures*. *State of the art*: Norwegian Public Roads Administration; 2011. 142 p. URL: https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2411102/coin31.pdf?sequence=1 (дата обращения: 02.09.2023)

Материалы и методы. Закономерность нарастания прочности бетона во времени при нормальных условиях в зависимости от типа цемента по кинетике твердения достаточно хорошо изучена и может быть представлена, например, в виде формулы EN 1992-1-1[2]:

$$\frac{R_\tau}{R_{28}} = \exp\left(s\left(1 - \sqrt{\frac{28}{\tau}}\right)\right), \text{ при } \tau > 1, \quad (3)$$

где R_τ, R_{28} — соответственно предел прочности бетона в возрасте τ и в проектном возрасте; s — коэффициент, учитывающий кинетику твердения бетона в зависимости от типа цемента и наличия добавок, регулирующих кинетику твердения (таблица 1)

Таблица 1

Некоторые данные о кинетике прочности бетона

Бетон по кинетике твердения	Значение s (1)	Время достижения 50 % проектной прочности, сут.	Значение R_2/R_{28}	
			EN 206.1	ГОСТ 25192-2012
Особобыстрый[1]	0,16[1]	1	—	—
Быстрый[1,2,3]	0,25[1]; (0,2)[4]	2	> 0,5	> 0,4
Средний[1,2]	0,33[1]; (0,25)[4]	3	0,3 — 0,5	—
Медленный[1,2]	0,42[1]; (0,38)[4]	4	0,15 — 0,3	≤ 0,4
Очень медленный[1,2,3]	0,6[1]	6	< 0,15	—

Примечание: 1 — предложение авторов; 2 — стандарт EN 206.1; 3 — ГОСТ 25192-2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования»; 4 — EN 1992-1-1

Согласно ГОСТ 31108 «Цементы общестроительные» цементы классифицируются по кинетике твердения на быстро-, нормально- и медленнотвердеющие, а согласно приложению А по эффективности при пропаривании, т. е. при твердении при повышенных температурах, цементы делятся на две группы, при этом соотношение активности после пропаривания по стандартному режиму к проектной составляет для классов цементов 42,5 и 52,5 примерно от 0,47 до 0,76. По ГОСТ 10178-85 «Портландцемент и шлакопортландцемент» (в настоящее время отменен) этот показатель составлял порядка 0,55 — 0,68 для портландцементов первой и второй группы эффективности. Согласно ГОСТ 24211-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов» добавки ускорители (замедлители) твердения должны обеспечивать ускорение (замедление) нарастания предела прочности в суточном возрасте не менее, чем на 30 %, причем согласно [13] данных для обоснованного прогноза влияния температуры на твердение бетонов с добавками в настоящее время недостаточно. Исходя из вышеизложенного, следует сделать заключение о широком диапазоне возможной кинетики твердения бетонов в зависимости от свойств цемента, наличия добавок и температурных условий.

В настоящей работе предложен подход к оценке относительной прочности бетона, твердеющего в температурных условиях, отличных от нормальных, основанный на гипотезе зависимости кинетики твердения бетона от кинетики тепловыделения цемента с учетом степени зрелости бетона ЗБ к моменту τ и эквивалентному времени выдерживания при 20 °С, которое далее будет называться «приведенное время твердения» $\tau_П$ и которое определяется как:

$$\tau_П = \frac{ЗБ}{20}, \quad (4)$$

Теоретическая оценка кинетики прочности бетонов в зависимости от типа цемента по кинетике твердения с учетом фактического тепловыделения твердеющего бетона и его температуры, в т. ч. нестационарной, может быть произведена из следующих общеизвестных положений. Во-первых, кинетика тепловыделения цемента может рассматриваться как показатель степени гидратации цемента и, закономерно, нарастания прочности. Во-вторых, степень гидратации цемента α в момент времени τ определяет пористость P цементного камня, а прочность R цементного камня и бетона определяется его пористостью:

$$R = f(P), \quad (5)$$

$$P = f(\alpha), \quad (6)$$

$$\frac{\alpha_\tau}{\alpha_{28}} = f\left(\frac{Q_\tau}{Q_{28}}\right). \quad (7)$$

Между пределом прочности бетона R_τ в момент τ и величиной тепловыделения Q_τ к этому моменту существует зависимость:

$$R_\tau = f(Q_\tau). \quad (8)$$

[2] EN 1992-1-1 (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. URL: https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf (дата обращения: 02.09.2023)

Указанная зависимость (8) может быть представлена, например, в виде:

$$\frac{R_\tau}{R_{28}} = b\cdot\left(\frac{Q_\tau}{Q_{28}}\right)^x, \quad (9)$$

где R_τ, Q_τ, R_{28}, Q_{28} —предел прочности и тепловыделение к моменту τ и в проектном возрасте, соответственно.

Пористость цементного камня может быть представлена, например, в виде:

$$P = k\left(\frac{1}{\rho_{Ц}} + \frac{В}{Ц}\right) - \left(\frac{(1+n)\alpha}{\rho_{ГЦ}} + \frac{1-\alpha}{\rho_{Ц}}\right), \quad (10)$$

где $\rho_{Ц}$ — истинная плотность цемента, принимаем в данном примере 3,1 г/см^3; $\rho_{ГЦ}$— истинная плотность цементного камня, принимаем по Пауэрсу 2,443 г/см^3; α — степень гидратации цемента, $\alpha = f\ (Q)$; k — коэффициент, учитывающий уменьшение первоначального объема вследствие контракционной усадки, зависит от степени гидратации цемента, для упрощения расчетов принимаем равным 0,98; n — количество химически связанной воды при полной гидратации цемента, принимаем 24 % от массы цемента.

Тогда пористость цементного камня может быть представлена как:

$$P = 0{,}386 - 0{,}185\alpha. \quad (11)$$

Поскольку предел прочности цементного камня и бетона в момент τ определяется его пористостью, например, в виде:

$$\frac{R_\tau}{R_{28}} = \exp(c\cdot P), \quad (12)$$

то с учетом (8) получим в нашем примере:

$$\frac{R_\tau}{R_{28}} = \exp\big(c\cdot(0{,}386 - 0{,}185\alpha)\big), \quad (13)$$

или, используя (3) и зависимость [15]:

$$\frac{Q_\tau}{Q_{28}} = \ \exp\ (k\cdot(1 - \left(\frac{28}{\tau}\right)^x)), \quad (14)$$

в качестве примера входящие в которую параметры k, x представлены в таблице 2.

Таблица 2

Количественные значения входящих в (5) для бетона класса B25

Темп твердения	Параметры в формуле		
	Q_{28}	k	x
Быстрый	130	0,15	0,47
Медленный	130	0,26	0,7

Допуская

$$\frac{\alpha_\tau}{\alpha_{28}} = \frac{Q_\tau}{Q_{28}}, \quad (15)$$

получим зависимость прочности бетона от тепловыделения в виде:

$$R_\tau = R_{28}\cdot\exp\left(c\cdot\left(0{,}386 - 0{,}185\cdot\exp\ (k\cdot(1 - \left(\frac{28}{\tau}\right)^x\right)\right). \quad (16)$$

Результаты исследования. Графический образ (16) в виде зависимости $R_\tau/R_{28} = f(\tau)$ представлен на рис. 1.

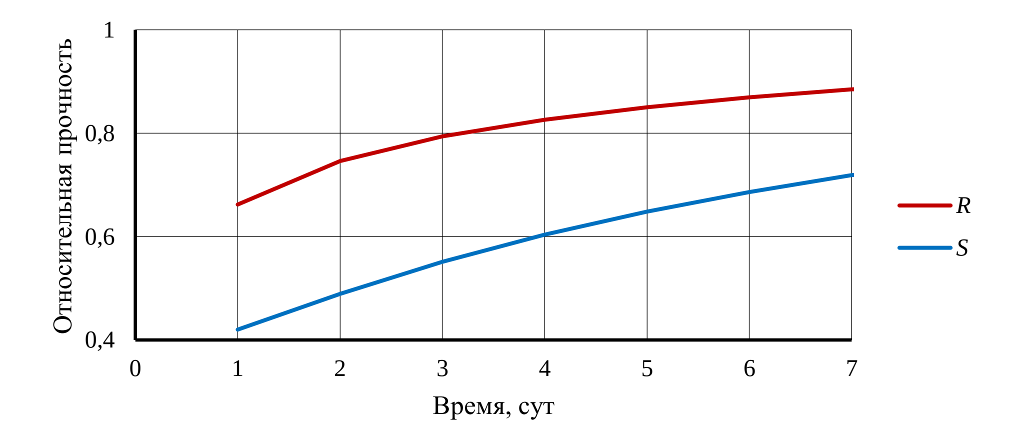


Рис. 1. Расчетная по (12) зависимость относительной прочности бетона:
R, S — соответственно быстро- и медленнотвердеющий бетон

Если представить зависимость (9) в виде:

$$\frac{R_\tau}{R_{28}} = \left(\frac{Q_\tau}{Q_{28}}\right)^{0,7}, \tag{17}$$

и использовать (14) для оценки кинетики тепловыделения, можно получить расчетные значения показателей кинетики прочности бетона R_τ/R_{28}, представленные совместно со всеми рассматриваемыми результатами на рис. 2.

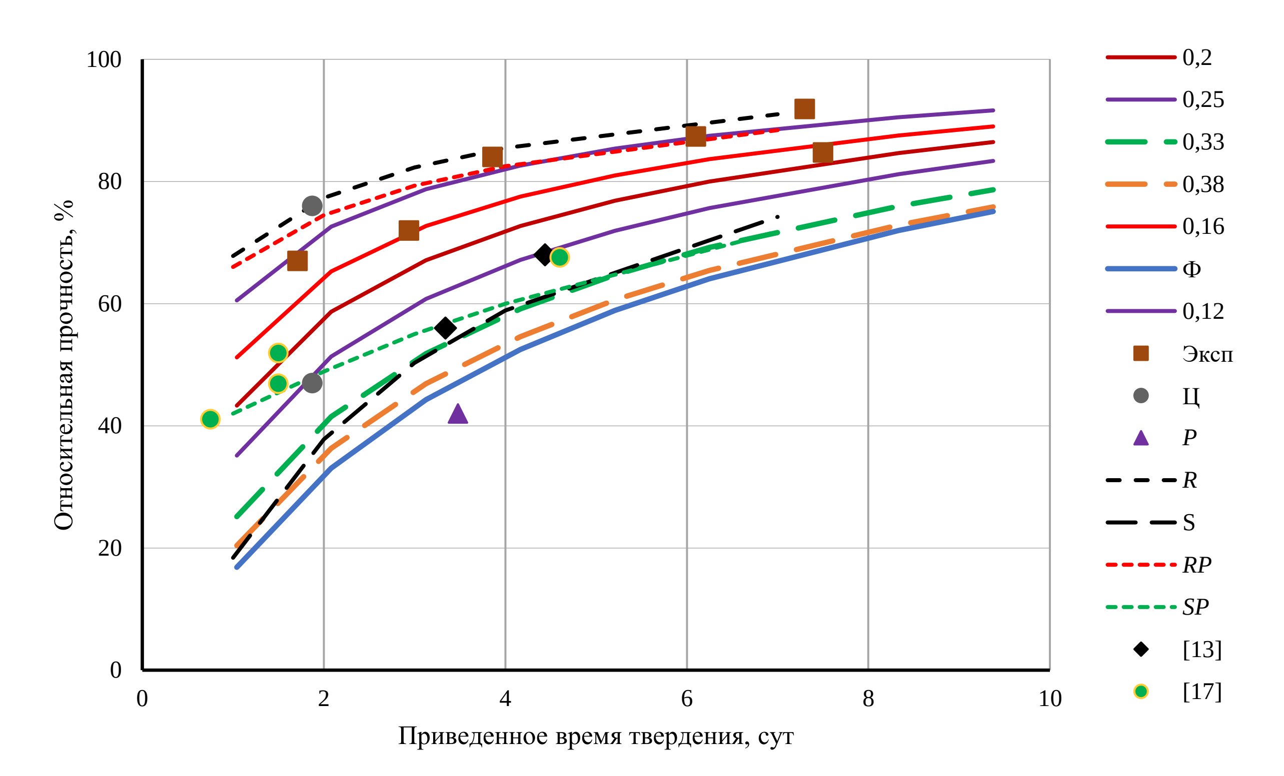


Рис. 2. Зависимость относительной прочности бетона от приведенного времени твердения:
0,12 … 0,38 — значения коэффициента *s* в (3) и таблице 1; Ф — по (1); Эксп — по экспериментальным данным [15];
Ц — данные для цементов по ГОСТ 31108 после стандартной тепловлажностной обработки;
Р — по приложению К в Р-НП СРО ССК-02-2015; *R, S* — расчетные значения по (17) соответственно
для быстро- и медленнотвердеющих бетонов; *RP, SP* — расчетные по (15) (рис. 1); [13] — по данным [11],
бетон *В*30, рецептурные особенности не указаны; [17] — по данным [15], ПЦ 500 с коэффициентом
эффективности при пропаривании не ниже 0,76

Представленные на рис. 2 данные свидетельствуют о том, что:

– цементы по ГОСТ 31108 могут характеризоваться весьма высокими показателями относительной прочности при твердении в температурных условиях, отличных от нормальных, причем эти результаты хорошо согласуются с расчетными значениями кинетики прочности бетонов по (17);

– экспериментальные значения относительной прочности бетонов [14], твердевших в температурных условиях, отличных от нормальных, хорошо согласуются с расчетными по (16) значениями, значения по данным [11, 18] также хорошо согласуются с расчетными;

– расчетные значения по (16) для быстротвердеющих бетонов практически совпадают с расчетными значениями по (17), а для медленнотвердеющих бетонов практически полное соответствие имеет место только для приведенного времени твердения более 4 сут. При времени менее 4 сут. различие с уменьшением приведенного времени твердения значительно возрастает, т. е. для быстротвердеющих бетонов результаты оценки кинетики прочности по кинетике тепловыделения и по величине пористости, определенной через степень гидратации, практически совпадают;

– для бетонов, твердеющих при температурах выше 20 °С и изготовленных на цементах первой группы эффективности при пропаривании по ГОСТ 31108, можно принимать показатель *s* в (3) примерно 0,12…0,16, а для практических целей предварительно 0,2, для бетонов на цементах второй группы — 0,25.

Обсуждение и заключение. Таким образом, относительная прочность бетона в зависимости от показателя его зрелости ЗБ, °С·ч, может быть определена в общем случае по (1) при значении τ, равном приведенному времени твердения $\tau_п$, сут., которое может быть определено в общем случае как:

$$\tau_{\text{П}} = \frac{\text{ЗБ}}{20} = \frac{\int_0^{\tau} f(\text{Т}\cdot\tau)d\tau}{20\cdot 24}, \qquad (18)$$

причем числитель в (18) может быть определен по графику «температура — время выдерживания» для любой точки конструкции численным интегрированием, например, методом трапеций.

Предложение по прогнозу прочности с учетом «приведенного времени» формулировалось еще в 1966 г. Запорожцем И.Д. с коллегами [11, 16]. Гипотеза «приведенного времени», согласно которой в моменты равных тепловыделений, т. е. при $Q1 = Q2$… при температурах, соответственно, $T1$ и $T2$, … отношение соответствующих сроков $\tau 1$ и $\tau 2$ остается постоянным на протяжении всего процесса, использована, например, в [18] при расчетах некоторых технологических параметров выдерживания массивных монолитных конструкций, в связи с чем использование предложенного выше «приведенного времени твердения» для оценки относительной прочности бетона с учетом его рецептурных особенностей по показателю степени зрелости представляется вполне обоснованным.

Список литературы

1. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В., Кардумян Г.С., Ургапов В.И. Опыт возведения уникальных конструкций из модифицированных бетонов на строительстве комплекса «Федерация». *Промышленное и гражданское строительство*. 2006;8:20–22. https://elibrary.ru/item.asp?id=9246707 (дата обращения: 30.08.2023).
2. Калиновская Н.Н., Осос Р.Ф., Кучук Е.В. Бетонирование фундаментной плиты турбоагрегата Белорусской АЭС с применением самоуплотняющегося бетона. *Технологии бетонов*. 2017;3(4):15–19. https://elibrary.ru/item.asp?id=29771157 (дата обращения 30.08.2023).
3. Добрецова И.В., Галактионов Д.Е. Температурный режим и термонапряженное состояние массивных железобетонных элементов конструкций АЭС при их возведении. В: *Доклады и выступления Седьмой научно-технической конференции «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии»*. Санкт-Петербург: ОАО «РусГидро»; 2013. С. 55–60.
4. Стручкова А.Я., Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Шайбакова А.А. Тепловыделение цемента и расчеты трещиностойкости бетонных массивов. *Инженерно-строительный журнал*. 2018;2(78):128–135. https://doi.org/10.18720/MCE.78.10
5. Муртазаев С.А.Ю., Сайдумов М.С., Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.А. Высокопрочные бетоны повышенной жизнеспособности для конструкций фундаментов МФК «Ахмат-Тауэр». В: *Сборник докладов Международного онлайн-конгресса «Фундаментальные основы строительного материаловедения»*. Белгород: БГТУ имени В.Г. Шухова; 2017. С. 875–883. https://elibrary.ru/item.asp?id=36305899 (дата обращения: 29.08.2023).
6. Журов Н. Н., Комиссаров С.В. Система температурно-прочностного контроля бетона в раннем возрасте. *Вестник МГСУ*. 2010;4–5:296–300. https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-temperaturno-prochnostnogo-kontrolya-betona-v-rannem-vozraste (дата обращения: 30.08.2023).
7. Trong-Chuc Nguyen, Tang Van Lam, Bulgakov BI. Designing the Composition of Concrete with Mineral Additives and Assessment of the Possibility of Cracking in Cement-Concrete Pavement. *Materials Science Forum*. 2018;931:667–673. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.667
8. Макеева А.В., Семенов К.В., Макеев А.А., Амелина А.В. Трещиностойкость массивных бетонных конструкций в строительный период с учетом температурных воздействий. *Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова*. 2019;8:30–38. https://doi.org/10.34031/article_5d49408e0e0b61.97206550
9. Федоров В.И., Местников А.Е. Мультипараметрическое уравнение оценки относительной прочности бетона при зимнем бетонировании. *Современные наукоемкие технологии*. 2018;11(2):227–231. https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37308 (дата обращения: 28.08.2023).
10. Мокшин Д.И., Гаусс К.С., Мокшин Р.И. Моделирование температурных полей и прогнозирование прочности бетона тонкостенных конструкций. Т.Ю. Овсянникова, И.Р. Салагор (ред.). В: *Материалы XI Международной научно-практической конференции «Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения»*. Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет; 2021. С. 526–528.
11. Дудин М.О., Ватин Н.И. Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом. *Инженерно-строительный журнал*. 2015;2(54): 33–45. https://doi.org/10.5862/MCE.54.4

12. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. О влиянии условий выдерживания при возведении массивных монолитных железобетонных конструкций на прочность бетона. *Инженерный вестник Дона*. 2021;10. https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228 (дата обращения: 30.08.2023).

13. Сердюкова А.А., Рахимбаев И.Ш. О механизме действия ускорителей схватывания и твердения цементной матрицы бетона. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013;2:26–28. http://dspace.bstu.ru/jspui/handle/123456789/810 (дата обращения: 26.08.2023).

14. Несветаев Г.В., Чепурненко А.С., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. Оценка некоторых методик для расчета температурных напряжений при бетонировании массивных железобетонных фундаментных плит. *Инженерный вестник Дона*. 2022;7. https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7817 (дата обращения: 30.08.2023).

15. Меренкова Н.В. Влияние температурного фактора на скорость набора прочности модифицированного бетона применительно к креплению вертикальных стволов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;7:376–379. https://www.giab-online.ru/catalog/10630 (дата обращения: 02.09.2023).

16. Семенов К.В., Барабанщиков Ю.Г. Термическая трещиностойкость массивных бетонных фундаментных плит и ее обеспечение в строительный период зимой. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014;2(17):125–135. https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2014/2(17)/10_semenov_17.pdf (дата обращения: 30.08.2023).

17. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. О влиянии условий твердения на свойства самоуплотняющихся бетонов. *Инженерный вестник Дона*. 2022;10. https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7927 (дата обращения: 30.08.2023).

18. Семенов К.В., Стручкова А.Я. Термическая трещиностойкость массивных железобетонных конструкций в строительный период. *AlfaBuild*. 2017;2(2):31–33. https://doi.org/10.34910/ALF.2.6

References

1. Kaprielov SS, Sheinfeld AV, Kiseleva YuA, Prigozhenko OV, Kardymyan GS, Urgapov VI. Erection of Unique Structures Made of Modified Concrete and Used for Construction of the Complex "Federation" MMDTS "Moscow-City". *Industrial and Civil Construction*. 2006;8:20–22. https://elibrary.ru/item.asp?id=9246707 (accessed: 30.08.2023). (In Russ.).

2. Kalinovskaya NN, Osos RF, Kuchuk EV. Concreting the Foundation Plate of the Turbo Unit of the Belarusian Nuclear Power Plant with the Use of Self-Compacting Concrete. *Concrete Technologies*. 2017;3(4):15–19. https://elibrary.ru/item.asp?id=29771157 (accessed: 30.08.2023). (In Russ.).

3. Dobretsova IV, Galaktionov DE. Temperature Regime and Thermal Stress State of Massive Reinforced Concrete Elements of NPP Structures during Their Construction. In: Proceedings of *the Seventh Science and Engineering Conference "Hydropower. New Developments and Technologies"*. St. Petersburg: JSC RusHydro; 2013. P. 55–60. (In Russ.).

4. Struchkova AYa, Barabanshchikov YuG, Semenov KV, Shaibakova AA. Heat Dissipation of Cement and Calculation of Crack Resistance of Concrete Massifs. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;2(78):128–135. https://doi.org/10.18720/MCE.78.10

5. Murtazaev SAYu, Saidumov MS, Alashanov AKh, Murtazaeva TSA. High-Strength Concretes of Increased Viability for Foundation Structures of the Multifunctional Complex "Akhmat-Tower". In: *Fundamental Principles of Building Materials Science. Collection of Reports of the International Online Congress*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 2017. P. 875–883. https://elibrary.ru/item.asp?id=36305899 (accessed: 29.08.2023). (In Russ.).

6. Zhurov NN, Komissarov SV. The System of Temperature-Strength Concrete Control at Early Age. *Vestnik MGSU*. 2010;4–5:296–300. https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-temperaturno-prochnostnogo-kontrolya-betona-v-rannem-vozraste (accessed: 30.08.2023). (In Russ.).

7. Trong-Chuc Nguyen, Tang Van Lam, Bulgakov BI. Designing the Composition of Concrete with Mineral Additives and Assessment of the Possibility of Cracking in Cement-Concrete Pavement. *Materials Science Forum*. 2018;931:667–673. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.667

8. Makeeva AV, Semenov KV, Makeev AA, Amelina AV. Crack Resistance of Massive Concrete Structures during the Building Period Taking into Account Temperature Effects. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019;8:30–38. https://doi.org/10.34031/article_5d49408e0e0b61.97206550 (In Russ.)

9. Fedorov VI, Mestnikov AE. Multi-Parameter Equation of Estimation of Relative Strength of Concrete in Winter Concreting. *Modern High Technologies*. 2018;11(2):227–231. https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37308 (accessed: 28.08.2023). (In Russ.)

10. Mokshin DI, Gauss KS, Mokshin RI. Modeling of Temperature Fields and Forecasting the Strength of Concrete of Thin-Walled Structures. In: Proceedings of the XI International Science and Practical Conference "*Investments, Urban Planning, Real Estate as Drivers of the Socio-Economic Development of the Territory and Improving the Quality of Life of the Population*. Tomsk: Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering; 2021. P. 526–528. (In Russ.)

11. Dudin MO, Vatin NI, Barabanshchikov YuG. Modeling a Set of Concrete Strength in the Program ELCUT at Warming of Monolithic Structures by Wire. *Magazine of Civil Engineering*. 2015;2(54):33–45. https://doi.org/10.5862/MCE.54.4 (In Russ.).

12. Nesvetaev GV, Koryanova YuI, Sukhin DP. On the Influence Temperature Conditions During Concreting of Massive Monolithic Reinforced Concrete Structures on the Strength of Concrete. *Engineering Journal of Don*. 2021;10. https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228 (accessed: 30.08.2023). (In Russ.).

13. Serdyukova AA, Rakhimbaev ISh. On the Mechanism of Action of Accelerators of Setting and Hardening of the Cement Matrix of Concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013;2:26–28. http://dspace.bstu.ru/jspui/handle/123456789/810 (accessed: 26.08.2023). (In Russ.).

14. Nesvetaev GV, Chepurnenko AS, Koryanova YuI, Sukhin DP. Evaluation of Some Methods for Calculating Temperature Stresses when Concreting Massive Reinforced Concrete Foundation Slabs. *Engineering Journal of Don.* 2022;7. https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7817 (accessed: 30.08.2023). (In Russ.).

15. Merenkova NV. Influence of a Temperature Factor on Speed of a Set of Durability of the Modified Concrete with Reference to Fastening of Vertical Trunks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2012;7:376–379. https://www.giab-online.ru/catalog/10630 (accessed: 02.09.2023). (In Russ.).

16. Semenov KV, Barabanshchikov YuG. Maintenance of Thermal Cracking Resistance in Massive Concrete Base Slabs during Winter Concreting. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014;2(17):125–135. https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2014/2(17)/10_semenov_17.pdf (accessed: 30.08.2023). (In Russ.).

17. Nesvetaev GV, Koryanova YuI, Sukhin DP. On the Influence of Hardening Conditions on the Properties of Self-Compacting Concrete. *Engineering Journal of Don.* 2022;10. https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7927 (accessed: 30.08.2023). (In Russ.).

18. Semenov KV, Struchkova AYa. Thermal Cracking Resistance in Massive Concrete Structures in the Building Period. *AlfaBuild*. 2017;2(2):31–33. https://doi.org/10.34910/ALF.2.6 (In Russ.).

Поступила в редакцию 01.09.2023
Поступила после рецензирования 15.09.2023
Принята к публикации 16.09.2023

Об авторах:

Несветаев Григорий Васильевич, профессор кафедры «Технология строительного производства» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, nesgrin@yandex.ru

Корянова Юлия Игоревна, доцент кафедры «Технология строительного производства», Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ScopusID, ORCID, koryanova.yi@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Г.В. Несветаев — формирование основной концепции, цели и задач исследования, обоснование критериев, общее планирование численного и натурного эксперимента, анализ результатов исследований, редактирование текста, корректировка выводов.

Ю.И. Корянова — детальное планирование, организация и реализация исследований, обработка и анализ результатов исследований, подготовка текста, формулировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 01.09.2023
Revised 15.09.2023
Accepted 16.09.2023

About the Authors:

Grigory V. Nesvetaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor of the Construction Production Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Professor, ORCID, nesgrin@yandex.ru

Yuliya I. Koryanova, Cand.Sci.(Engineering), Associate Professor of the Construction Production Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ORCID, koryanova.yi@mail.ru

Claimed contributorship:

Nesvetaev GV — formulating the main concept, aim and objectives of the research, substantiation of the criteria, general planning of the numerical and field experiments, analysis of the research results, text editing, correcting the conclusions.

Koryanova YuI — detailed planning, organisation and implementation of the research, processing and analysis of the research results, preparing the text, formulating the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ





УДК 691.326

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-69-76

О динамике улучшения технологических и эксплуатационных свойств пенобетонов при их дисперсном армировании полипропиленовыми волокнами

В.Н. Моргун ✉

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ vnmorgun@sfedu.ru

Аннотация

Введение. Кратко отражена эффективность производства и применения в строительстве материалов из газонаполненных бетонов. Перечислены причины ограничения номенклатуры выпускаемых изделий. Приведена информация об эволюции технологии пенобетонов, дисперсно армированных волокнами. Сформулирована необходимость в научных исследованиях, направленных на изучение динамики технологических и эксплуатационных свойств пенобетонов при их дисперсном армировании полипропиленовыми волокнами.

Материал и методы. Перечислены состав и свойства материалов, использованных для изготовления пенобетонных смесей. Указан перечень методов, примененных при оценке технологических и механических свойств исследуемых материалов.

Результаты исследования. Приведены результаты экспериментальной оценки влияния длины и расхода полипропиленовой фибры на динамику роста пластической прочности в равноплотных пено- и фибробетонных смесях. Выполнен анализ меры влияния полипропиленовой фибры на динамику пластической прочности исследуемых смесей. Дано научное обоснование причин ускорения процессов массопереноса при дисперсном армировании смесей волокнами. Приведены результаты испытаний на растяжение при изгибе крупноразмерных образцов из бетона D600.

Обсуждение и заключение. Установлено эффективное положительное влияние полипропиленовой фибры на свойства пенобетона, корреляционно зависящее от её длины, а именно:
– скорость фазового перехода;
– предельная растяжимость;
– модуль упругости и прочность бетона D600.

Ключевые слова: пенобетонная смесь, фибра, пластическая прочность, прочность на растяжение при изгибе

Для цитирования. Моргун В.Н. О динамике улучшения технологических и эксплуатационных свойств пенобетонов при их дисперсном армировании полипропиленовыми волокнами. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):69–76. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-69-76

Original article

About Dynamics of Improving the Foam Concrete Technological and Operational Properties upon Disperse Reinforcement with Polypropylene Fibers

Vladimir N. Morgun ✉

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ vnmorgun@sfedu.ru

Abstract

Introduction. The efficiency of the foam concrete products manufacture and application in construction is briefly overviewed. The reasons constraining the nomenclature of the manufactured products are listed. The information

about evolvement of the foam concrete disperse fiber-reinforcement technology is provided. The need for scientific research aimed at studying the dynamics of the foam concrete technological and operational properties upon disperse reinforcement with polypropylene fibers is formulated.
Materials and Methods. The composition and properties of the materials used for manufacturing the foam concrete mixtures are listed. The methods used for assessing the technological and mechanical properties of the materials under study are indicated.
Results. The results of the experimental assessment of the polypropylene fiber length and amount influence on the dynamics of the plastic strengthening growth of the equally dense foam and fiber-reinforced concrete mixtures are presented. The scope of the polypropylene fiber influence on the dynamics of the studied mixtures plastic strengthening is analysed. The scientific substantiation of the reasons accelerating the mass transfer processes during the disperse reinforcement of mixtures with fibers is given. The results of the bending tensile strength tests of the large-size D600 concrete specimens are presented.
Discussion and Conclusion. The efficient positive influence of the polypropylene fiber, in correlation with its length, on the following foam concrete properties has been distinguished:
– speed of phase transfer;
– ultimate extensibility;
– elasticity and strength modulus of D600 concrete.

Keywords: foam concrete mixture, fiber, plastic strengthening, bending tensile strength

For citation. Morgun VN. About Dynamics of Improving the Foam Concrete Technological and Operational Properties upon Disperse Reinforcement with Polypropylene Fibers. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):69–76. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-69-76

Введение. Практическая потребность в строительных изделиях из высококачественных газонаполненных бетонов диктуется проблемами энерго- и ресурсосбережения, существующими в современном социуме и весьма остро проявляющимися в строительстве, потому что именно эта отрасль материального производства характеризуется максимальной материалоемкостью [1, 2]. Самыми эффективными с этой точки зрения принято считать ячеистые бетоны, которые представлены в практике строительства изделиями заводского производства двух видов: пенобетонами и газобетонами.

Если рассматривать номенклатуру строительных изделий, которая корреляционно зависит от технологических и эксплуатационных свойств этих материалов, то важно констатировать, что во второй половине XX века наилучшими из перечисленных свойств обладали газобетоны [3]. Из газобетонных смесей по автоклавной технологии изготовлялась обширная номенклатура строительных изделий, важнейшими из которых были крупноразмерные плиты покрытий промзданий и стеновые панели, производство которых впервые в мировой практике было освоено в 1953 г. специалистами СССР [4].

Высокий уровень требований к сопротивлению теплопередаче, который был принят в европейских странах в 80-х годах прошлого века, а в РФ вступил в действие с 01.01.2000 г., привел к тому, что из автоклавных газобетонов большинство действующих предприятий изготовляет только мелкоштучные изделия в виде блоков. Основной причиной утраты освоенной ранее номенклатуры изготовляемых изделий стала прочность на растяжение, которая у всех разновидностей бетонных материалов, изготовляемых по автоклавной технологии, составляет 8…15 % от прочности на сжатие.

Наиболее привлекательными для современного строительства по плотности являются ячеистые бетоны марок D400…D600 при их классе по прочности на сжатие В3,5…5,0 МПа. Это значит, что их прочность на растяжение не превышает 0,5 МПа. При такой прочности кантование крупноразмерных панелей становится технически неосуществимым, поэтому предприятия и стали выпускать только мелкоштучные изделия.

Теория и практика пенобетонов, дисперсно армированных волокнами, прочность которых на растяжение может в разы превышать это же свойство автоклавного газобетона [5, 6], начала историю своего развития на кафедре «Технология строительных изделий и конструкций» Ленинградского инженерно-строительного института в 80-х годах прошлого века [7] с попытки применения отходов полиамидных волокон в одностадийной технологии пенобетонов [8].

С тех пор прошло более 40 лет, изменились технологии и свойства синтетических волокон, выпускаемых современной промышленностью [9, 10]. Накопился объем знаний об этапах и процессах массопереноса, протекающих при формировании упругой структуры пенобетонов [11, 12]. Поэтому в данной работе будет рассмотрена важная для практики применения таких бетонов в строительстве взаимосвязь между механическими свойствами пенобетонных смесей и эксплуатационными — затвердевших материалов.

Материалы и методы. Для изготовления равноплотных пенобетонных смесей применяли рядовой портландцемент ОАО «Новоросцемент» ПЦ 500 Д0, в котором содержание C3S составляло 57,92 %, C2S — 21,06 %, C3A — 5,54 %, C4AF достигало 12,98 %. В качестве заполнителя применялся речной песок чистый сухой фракции мельче 0,315 мм. Соотношение по массе между вяжущим и заполнителем составляло Ц:З = 1:1.

В качестве дисперсной арматуры применяли щелочестойкую полипропиленовую фибру (ПП), производимую ООО «Си-Айрлайд» и обладающую следующими свойствами:

– плотность 0,91 г/см^3;
– водопоглощение 0,1 %;
– модуль упругости 8000 МПа;
– прочность на растяжение 600 МПа;
– предельная растяжимость до 15 %;
– длина 18 и 40 мм;
– диаметр 0,018 мм.

В качестве пенообразователя был использован «Lumorol GR 1550» ООО «Компания Русский Ветер». Вода водопроводная.

Изготовление пенобетонных смесей осуществляли по одностадийной технологии в лабораторном турбулентном смесителе емкостью 60 литров при скорости вращения рабочего органа 750 об/мин. Исследования динамики изменения пластической прочности классических пеносмесей и дисперсно армированных полипропиленовой фиброй различной длины осуществляли в течение 3-х часов после формования экспериментальных образцов по методике [13].

Оценку механических свойств затвердевших пенобетонов в состоянии естественной влажности выполняли по результатам испытаний образцов-кубов размером 100×100×100 мм и балок размером 150×150×600 мм, твердевших в нормальных условиях 28 дней.

Результаты исследования. В таблице 1 приведены экспериментально полученные результаты влияния полипропиленовой фибры длиной 18 и 40 мм на динамику изменения во времени пластической прочности — важнейшего технологического свойства, управляющего мерой дефектности затвердевшего пенобетона. Известно [14, 15], что для любого вида газонаполненного бетона чем быстрее величина пластической прочности смесей достигает уровня, превышающего 200 Па, тем он будет прочнее.

Таблица 1

Влияние длины и расхода полипропиленовой фибры на динамику роста пластической прочности в равноплотных пенобетонных смесях

Содержание фибры		Плотность, г/л		Длина фибры, мм	Пластическая прочность (Па) через время твердения (мин.)				
% от объема цементного камня	г/замес	смеси	сухого бетона		0	30	60	120	180
0	нет	822	616	0	48	61	76	103	171
0,75	56,1	825	603	18	50	70	97	134	215
1,5	132,2	811	596	18	53	77	103	175	382
0,75	56,1	806	601	40	51	89	114	186	422
1,5	132,2	805	592	40	55	96	119	216	482

Из данных, приведенных в таблице 1, следует, что сразу после укладки пенобетонных смесей в опалубку различия в величине пластической прочности, которую также называют вязкостью смесей, незначительны. Эти различия не превышают 15 %, а при сравнении значений по абсолютной величине можно считать, что они укладываются в диапазон ошибок измерения. Однако с течением времени различия интенсивно нарастают. И через 3 часа твердения они превышают 180 %.

Полувековой практический опыт производства мелкоштучных блоков из газосиликата говорит о том, что резку газобетонных массивов на технологических линиях начинают после достижения ими пластической прочности, равной 200 Па. Следовательно, можно утверждать, что указанная величина достоверно характеризует достаточную для практики структурную устойчивость газонаполненного бетона, который находится в стадии фазового перехода «из вязкого в упругое».

Из полученных данных (таблица 1) следует, что пенобетонные смеси, не содержащие дисперсной арматуры, должны быть защищены от любых видов внешних воздействий (перемещений, толчков, колебаний температуры и влажности окружающей среды и т. п.) в течение времени, превышающего 3 часа.

Если пеносмесь дисперсно армировать короткой фиброй (18 мм) в незначительном количестве (примерно 0,75 % от объема цементного камня), то время выдержки можно ограничить 3 часами. А при более высоком содержании короткой фибры в структуре межпоровых перегородок время, необходимое для обеспечения достаточной структурной прочности, сокращается до 2,5 часов.

Использование длинной фибры (40 мм) позволяет достигать более существенного положительного влияния на динамику пластической прочности в пенобетонных смесях (см. таблицу 1). При содержании 40-милиметровой фибры в количестве 0,75 % от объема цементного камня смеси достигают достаточной для практики макроструктурной прочности через 2,25 часа. Большее содержание длинной фибры (1,5 %) гарантированно обеспечивает необходимую меру стабилизации газонаполненной структуры уже через 2 часа выдержки бетонной смеси в формах.

Анализ причин явлений, установленных в ходе экспериментальных исследований, показывает, что они относятся к уровню слабых взаимодействий, возникающих в высокообводненных дисперсных системах [12]. У использованной в исследованиях синтетической фибры диаметр более чем в 1000 раз меньше длины.

Фибра, в отличие от песка — зернистого заполнителя, является гибким сырьевым компонентом, обладающим анизотропностью формы. Фибра при изготовлении пенобетонной смеси располагается в объеме межпоровых перегородок за счет своей способности искривляться под действием капиллярных сил жидкой фазы. Эта её особенность чрезвычайно важна для технологии пенобетонных смесей, потому что гибкость синтетической фибры исключает возможность разрушения пенных пленок в период их приготовления и транспортирования.

Кроме того, все высокомолекулярные синтетические материалы по сравнению с минеральными обладают более высоким поверхностным энергетическим потенциалом [16]. А учитывая электролитические свойства воды и поверхностный потенциал фибры, можно полагать, что дисперсная арматура в составе пенобетонной смеси после завершения перемешивания и укладки в опалубку становится активным инициатором формирования линейных кластеров в структуре межпоровых перегородок.

Из работ В.Т. Перцева [17] следует, что при формировании цементосодержащих кластеров в обводненных дисперсных системах всегда имеет место процесс, заключающийся в отжатии из их структуры физически слабо связанной воды по направлению от центра к периферии. Полагаю, что именно этот процесс массопереноса предопределяет ускоренный фазовый переход «из вязкого в твердое» (таблица 1), выражающийся в ускоренном росте пластической прочности исследованных смесей и зафиксированный в ходе настоящих исследований.

Экспериментальную оценку меры упрочнения пенобетона при дисперсном армировании его полипропиленовой фиброй различной длины в количестве 1,5 % от объема цементного камня осуществляли на образцах из пенобетона плотностью 600 кг/м^3 размером 150×150×600 мм. Полученные результаты отражают существенное влияние длины фибры на модуль упругости, прочность и предельную деформативность пенобетона 600 (рис. 1).

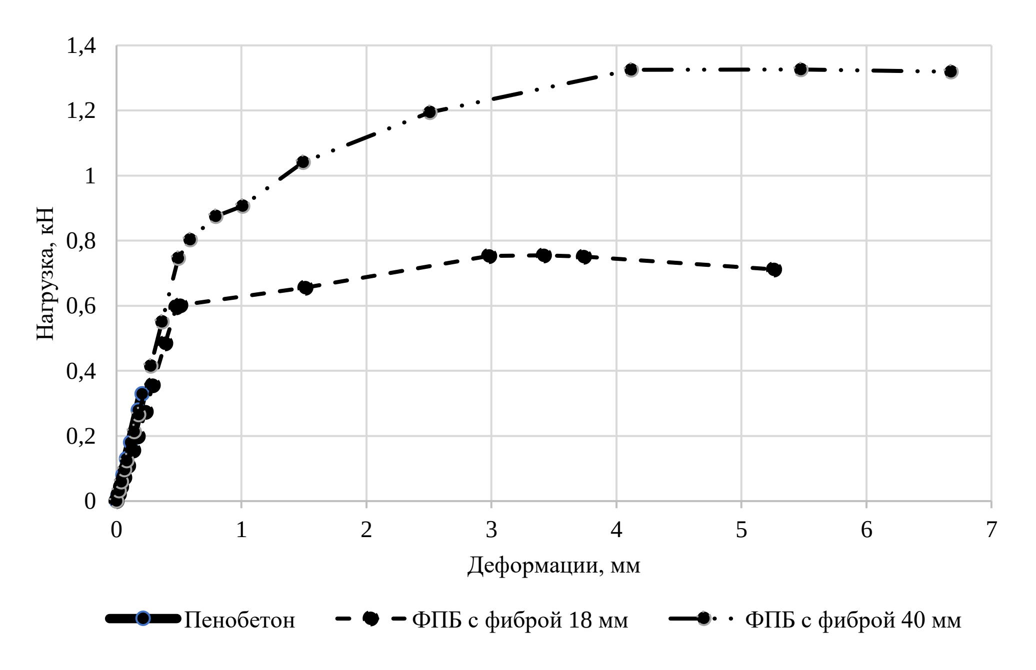


Рис. 1. Конструкционные свойства пено- и фибропенобетонов

Из графика, представленного на рис. 1, следует, что дисперсное армирование пенобетона полипропиленовыми волокнами принципиально влияет на такие его свойства, как модуль упругости на растяжение при изгибе, предельную деформативность и механическую прочность. Результаты эксперимента, представленные в координатах «нагрузка — деформации», отражают тот факт, что пенобетон разрушается хрупко, и величина его предельной растяжимости, установленная при испытании образцов размером 150×150×600 мм, не превышает 0,58 мм/м при модуле упругости E = 6250 МПа.

Равноплотный контрольному фибропенобетон, содержавший 1,5 % полипропиленовых волокон длиной 18 мм, повысил свою предельную деформативность до 1,20 мм/м при модуле упругости 11178 МПа. Увеличение длины фибры до 40 мм позволило получить каменный материал с предельной растяжимостью 1,23 мм/м и модулем упругости на растяжение при изгибе 15114 МПа. Представленные значения конструкционных свойств фибропенобетона D600 показывают, что по величине модуля упругости исследованный фибропенобетон может конкурировать с мелкозернитстым бетоном слитной структуры класса В10 или классическим бетоном класса В7,5.

Важно отметить, что в ходе испытаний на растяжение при изгибе крупноразмерные балки из классического пенобетона под действием разрушающей нагрузки хрупко разделялись на части. То есть изделия из такого материала при возникновении чрезвычайных ситуаций (землетрясения, взрывы и т. п.) становятся травмоопасными. Балки из дисперсно армированного пенобетона размером 150×150×600 мм сначала визуально прогибались, затем в растянутой зоне возникала магистральная трещина, но полного разделения образца на части не происходило. Балка утрачивала несущую способность, однако дисперсная арматура, расположенная перпендикулярно направлению развития трещины, предупреждала о возможности разделения изделия на части (рис. 2) и создавала предпосылки для защиты живых организмов от осколков конструкции.



Рис. 2. Фото балки из фибропенобетона размером 150×150×600 мм после утраты несущей способности

Расчет прочности крупноразмерных балок на растяжение при изгибе показал, что у пенобетона она составила 46 кПа. У равноплотного пенобетона с фиброй длиной 18 мм в 3,6 раза выше, т. е. 168 кПа. Если фибра имеет длину 40 мм, то прочность на растяжение при изгибе в 6,4 раза выше контрольного и достигает 296 кПа.

Обсуждение и заключения. Представленные результаты отражают комплексное положительное влияние дисперсного армирования полипропиленовыми волокнами на свойства смесей и затвердевших пенобетонов. Это позволяет прогнозировать значимый технико-экономический эффект в случае освоения технологии и применения изделий из таких материалов, потому что:

– ускорение фазового перехода пенобетонных смесей «из вязкого в упругое» при их дисперсном армировании полипропиленовыми волокнами создает комфортные условия для формирования высокопрочных межпоровых перегородок в газонаполненном бетоне;

– повышение предельной растяжимости каменных материалов лежит в основе их эксплуатационной надежности при эксплуатации в условиях знакопеременных температур, при широком размахе колебаний относительной влажности среды и при сейсмических воздействиях;

– рост модуля упругости на растяжение позволяет прогнозировать возможность расширения номенклатуры изделий из фибропенобетона;

– повышение прочности изделий заводского изготовления на растяжение при изгибе создает предпосылки для уменьшения потерь при их транспортировании, что особенно значимо для районов РФ с проблемными дорогами и не имеющими развитой инфраструктуры.

Список литературы

1. Казин А.С. Индустриальное домостроение: вчера, сегодня, завтра. *Жилищное строительство.* 2018;(10):22–26. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/industrialnoe-domostroenie-vchera-segodnya-zavtra (дата обращения: 07.09.2023).

2. Фаррахов А.Г. Особенности ресурсосбережения в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве. *Национальные интересы: приоритеты и безопасность.* 2015;11(11):53–60. URL: https://www.fin-izdat.ru/journal/national/detail.php?ID=65126 (дата обращения: 07.09.2023).

3. Песцов В.И., Оцоков К.А., Вылегжанин В.П., Пинскер В.А. Эффективность применения ячеистых бетонов в строительстве России. *Строительные материалы.* 2004;(3):7–8. URL: http://rifsm.ru/u/f/sm_03_04.pdf (дата обращения: 07.09.2023).

4. Пинскер В.А., Вылегжанин В.П. Ячеистый бетон как испытанный временем материал для капитального строительства. *Строительные материалы.* 2004;(3):44–45. URL: http://rifsm.ru/u/f/sm_03_04.pdf (дата обращения: 04.09.2023).

5. Моргун В.Н., Моргун Л.В., Смирнова П.В., Набокова Я.С., Костыленко К.И., Богатина А.Ю. Строительная наука для реализации ФЗ № 261. *Техническое регулирование.* 2011;(10):21–24.

6. Пухаренко Ю.В., Голубев В.Ю. О вязкости разрушения фибробетона. *Вестник гражданских инженеров.* 2008;(3):80–83.

7. Лобанов И.А. Особенности структуры и свойств дисперсно армированных бетонов. В: *Сборник трудов «Технология изготовления и свойства новых композиционных строительных материалов»*. Ленинград: ЛИСИ; 1982. С. 5–10.

8. Лобанов И.А., Пухаренко Ю.В. *Сырьевая смесь для изготовления ячеистых бетонов.* Патент СССР, авторское свидетельство № 863545.1981. 3 с. URL: https://patentdb.ru/image/1872622 (дата обращения: 02.09.2023).

9. Перепелкин К.Е. Современные химические волокна и перспективы их применения в текстильной промышленности. *Российский химический журнал (Журнал российского химического общества им. Д.И. Менделеева).* 2002;46(1):31–48. URL: https://www.chem.msu.su/rus/jvho/2002-1/31.pdf (дата обращения: 04.09.2023).

10. Сазанкова Е.С. *Обоснование параметров ленточных конвейеров для транспортирования горной массы по пространственной криволинейной трассе с учетом пусковых режимов.* Дис. канд. техн. наук. Москва; 2012. 149 с.

11. Пухаренко Ю.В., Староверов В.Д., Герасименко А.А. Повышение безопасности и качества строительных материалов на основе оценки опыта и деловой репутации предприятия. *Строительные материалы.* 2019;(5):3–8. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-3-8

12. Моргун В.Н., Моргун Л.В., Богатина А.Ю. Экспериментальная оценка наноэффектов в технологии пенобетонов. *Строительные материалы.* 2020;(7):45–48. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-45-48

13. Моргун В.Н. *Способ определения пластической прочности пенобетонной смеси.* Патент РФ, № 2316750. 2008. 6 с.

14. Шахова Л.Д. *Технология пенобетона. Теория и практика.* Монография. Москва: Ассоциация строительных вузов; 2010. 248 с.

15. Моргун Л.В., Вотрин Д.А., Моргун В.Н. Влияние диаметра дисперсной арматуры на скорость фазового перехода в пенобетонных смесях. *Строительные материалы.* 2018;(11):27–30. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-765-11-27-30

16. Perepelkin K.E. Russian Aromatic Fibres. Hearle J.W.S. (ed.) In book: *High-Performance Fibres.* Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2001. 334 p. URL: http://library.navoiy-uni.uz/files/hearle%20j.w.s.%20(ed.)%20-%20high%20performance%20fibres%20(1st%20edition)(2001)(329s).pdf (дата обращения: 07.09.2023).

17. Перцев В.Т. *Управление процессами раннего структурообразования бетонов.* Монография. Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет; 2006. 234 с

References

1. Kazin AS. Industrial Housing Construction: Yesterday, Today, Tomorrow. *Housing Construction.* 2018;(10):22–26. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/industrialnoe-domostroenie-vchera-segodnya-zavtra (accessed: 07.09.2023). (In Russ.).

2. Farrakhov AG. Resource-Saving in the Construction and Housing-and-Utilities Sector. *National Interests: Priorities and Security.* 2015;11(11):53–60. URL: https://www.fin-izdat.ru/journal/national/detail.php?ID=65126 (accessed: 07.09.2023). (In Russ.).

3. Pestsov VI, Otsokov KA, Vylegzhanin VP, Pinsker VA. The Efficiency of the Cellular Concrete Use in the Construction of Russia. *Stroitel'nye materialy (Construction Materials).* 2004;(3):7–8. URL: http://rifsm.ru/u/f/sm_03_04.pdf (accessed: 07.09.2023). (In Russ.).

4. Pinsker VA, Vylegzhanin VP. Cellular Concrete as a Time-Tested Material for Capital Construction. *Stroitel'nye materialy (Construction Materials).* 2004;(3):44–45. URL: http://rifsm.ru/u/f/sm_03_04.pdf (accessed: 04.09.2023). (In Russ.).

5. Morgun VN, Morgun LV, Smirnova PV, Nabokova YaS, Kostylenko KI, Bogatina AYu. Civil engineering Science for the Implementation of Federal Law No. 261. *Tekhnicheskoe regulirovanie* . 2011;(10):21–24. (In Russ.).

6. Pukharenko YuV, Golubev VYu. About the Viscosity of the Fiber Concrete Destruction. *Bulletin of Civil Engineers.* 2008;(3):80–83. (In Russ.).

7. Lobanov IA. Features of the Structure and Properties of Dispersed Reinforced Concrete. In: *Collection of Works "Manufacturing Technology and Properties of New Composite Building Materials".* Leningrad: LISI; 1982. P. 5–10. (In Russ.).

8. Lobanov IA, Pukharenko YuV. *Raw Mix for the Manufacture of Cellular Concrete.* USSR Patent, Certificate No 863545.1981. 3 p. URL: https://patentdb.ru/image/1872622 (accessed: 02.09.2023). (In Russ.).

9. Perepelkin KE. Modern Chemical Fibers and Prospects for Their Use in the Textile Industry. Rossiiskii *Khimicheskii Zhurnal (Russian Chemistry Journal) (Journal of the Russian Chemical Society named after D.I.Mendeleev).* 2002;46(1):31–48. URL: https://www.chem.msu.su/rus/jvho/2002-1/31.pdf (accessed: 04.09.2023). (In Russ.).

10. Sazankova ES. *Justification of the Parameters of Belt Conveyors for Transporting Rock Mass along a Spatial Curved Route, Taking into Account the Starting Modes.* Cand.Sci (Engineering) Dissertation. Moscow; 2012. 149 p. (In Russ.).

11. Pukharenko YuV, Staroverov VD, Gerasimenko AA. Improving the Safety and Quality of Building Materials Based on the Assessment of Experience and Business Reputation of the Enterprise. *Stroitel'nye materialy (Construction Materials).* 2019;(5):3–8. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-3-8 (In Russ.).

12. Morgun VN, Morgun LV, Bogatina AYu. Experimental Assessment of Nano-Effects in Foam Concrete Technology. *Stroitel'nye materialy (Construction Materials).* 2020;(7):45–48. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-45-48 (In Russ.).

13. Morgun VN. *Method of Determination of Plastic Strength of Foam Concrete Mixtures.* RF Patent No 2316750. 2008. 6 p. (In Russ.).

14. Shakhova LD. *Foam Concrete Technology. Theory and Practice.* Monograph. Moscow: Association of Civil Engineering Universities; 2010. 248 p. (In Russ.).

15. Morgun LV, Votrin DA, Morgun VN. Influence of the Disperse Reinforcement Diameter on the Speed of Phase Transfer in Fibro-Foam Concrete Mixes. *Stroitel'nye materialy (Construction Materials).* 2018;(11):27–30. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-765-11-27-30 (In Russ.).

16. Perepelkin K.E. Russian Aromatic Fibres. Hearle J.W.S. (ed.) In book: *High-Performance Fibres.* Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2001. 334 p. URL: http://library.navoiy-uni.uz/files/hearle%20j.w.s.%20(ed.)%20-%20high%20performance%20fibres%20(1st%20edition)(2001)(329s).pdf (accessed: 07.09.2023).

11. Pertsev VT. *Management of the Early Concrete Structuring Processes.* Monograph. Voronezh: Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering; 2006. 234 p. (In Russ.).

Поступила в редакцию 12.09.2023
Поступила после рецензирования 22.09.2023
Принята к публикации 06.10.2023

Об авторе:

Моргун Владимир Николаевич, доцент кафедры Инженерно-строительных дисциплин Южного федерального университета (344006, РФ, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42), кандидат технических наук, vnmorgun@sfedu.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Received 12.09.2023
Revised 22.09.2023
Accepted 06.10.2023

About the Author:
Vladimir N. Morgun, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Engineering and Construction Disciplines Department, Southern Federal University (105/42, B. Sadovaya str., Rostov-on-Don, 344006, RF), vnmorgun@sfedu.ru

Conflict of interest statement: the author do not have any conflict of interest.

Author have read and approved the final manuscript.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ





УДК 624.011

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-77-83

К вопросу определения модуля упругости бамбука Мосо при растяжении



С.В. Скуратов ✉, С.В. Щуцкий, А.А. Лиманцев, Сун Сюаньчжень

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ svskuratov@yandex.ru

Аннотация

Введение. Указывается на большое количество работ, посвященных исследованиям физико-механических свойств бамбуков, способов узловых соединений стержней из бамбука. Перечислены основные «бамбуковые» страны, в которых в качестве конструкционного материала бамбук набирает популярность в современной строительной сфере. С развитием современных технологий обработки бамбук находит широкое применение в строительной отрасли, в том числе при изготовлении плит и досок, а также при декорировании и внутренней отделке помещений в восточном стиле. Результаты исследований физико-механических свойств различных видов бамбуков, проведенных учеными разных стран, в настоящее время объединены в три издания ISO, регламентирующих правила применения бамбуков в строительстве.

Материалы и методы. Рассмотрение макроструктуры бамбука позволяет охарактеризовать высокие механические свойства, присущие естественным и искусственным полимерам. Подобный подход к рассмотрению бамбука и древесины как природных полимеров позволяет использовать при определении механических характеристик бамбука методики, применяемые к испытаниям древесины и конструкционных пластмасс. Изготовлены две серии образцов по пять штук в каждой. Составлены таблицы геометрических характеристик сечений образцов. Предложено конструктивное решение, связанное с усилением лопаток образцов эпоксидной композицией с целью повышения надежности закрепления образцов в захватах испытательной установки.

Результаты исследования. Для определения модуля упругости бамбука при растяжении разработана и изготовлена экспериментальная установка, состоящая из двух захватов, в которые помещается испытываемый образец. Через нижний захват производится приложение испытательной нагрузки посредством стальной тяги с нагрузочной платформой, на которую укладываются тарированные штучные грузы. Для определения величины абсолютного удлинения базы образца при растяжении используются контактные прогибомеры, в качестве которых применены индикаторы часового типа фирмы «Mitutoyo» (Япония).

Обсуждение и заключение. Приведена формула для определения модуля упругости при растяжении. За результат испытаний принимают среднее арифметическое значение модуля упругости испытываемых образцов и среднее квадратичное отклонение результатов модуля упругости. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о достоверном совпадении экспериментальных значений модуля упругости бамбука Мосо при растяжении с известными в технической литературе значениями.

Ключевые слова: модуль упругости, бамбук Мосо, образец, растяжение, древесина, конструкционные пластмассы

Для цитирования. Скуратов С.В., Щуцкий С.В., Лиманцев А.А., Сун Сюаньчжень. К вопросу определения модуля упругости бамбука Мосо при растяжении. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):77–83. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-77-83

Original article

On the Issue of Determining the Tensile Elastic Modulus of Moso Bamboo

Sergey V. Skuratov ✉, **Sergey V. Shchutsky** , **Aleksey A. Limantsev** , **Song Xuanzhen**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ svskuratov@yandex.ru

Abstract

Introduction. Numerous works devoted to studying the physical and mechanical properties of bamboo and the methods of bamboo rods' node connections are identified. The main "bamboo" countries, where bamboo is becoming popular as a structural material in the modern construction industry, are listed. Due to development of the modern processing technologies, bamboo is widely used in the construction industry, including the slab and board manufacture, as well as the decoration and indoor finishing in the oriental style. The results of studying the physical and mechanical properties of various types of bamboo conducted by the scientists from different countries are currently integrated into three ISO standards regulating the rules of bamboo application in construction.

Materials and Methods. Studying the bamboo macrostructure makes it possible to specify the superior mechanical properties attributed to natural and artificial polymers. Such an approach to studying bamboo and wood as natural polymers makes it possible to apply the methods used in testing the wood and engineering plastics to determining the mechanical properties of bamboo. Two sets of specimens each consisting of five items have been produced. The geometric specification tables of the specimens' cross-sections have been drawn up. A design solution has been proposed to strengthen the head of a specimen with the epoxide compound aiming to improve reliability of fixing a specimen in the test unit grippers.

Results. To determine the bamboo tensile elastic modulus, a test unit consisting of two grippers, into which a test specimen is placed, has been developed and manufactured. Through the lower gripper, the test load has been applied by means of a steel pull rod with a loading platform, on which the calibrated single-piece loads have been put. To determine the magnitude of the absolute elongation of the specimen base in tension, the contact deflectometers, i.e. the Mitutoyo dial gauges (Japan), have been used.

Discussion and Conclusion. The formula for determining the tensile elastic modulus is given. Finding the arithmetic mean value of the tested specimens' elasticity modulus and the mean square deviation of the elasticity modulus is considered to be the result of the test. The analysis of the obtained results allows us to conclude that the experimental values of the tensile elastic modulus of Moso bamboo validly coincide with the values known in the technical publications.

Keywords: modulus of elasticity, moso bamboo, specimen, tensile, wood, engineering plastics.

For citation. Skuratov SV, Shchutsky SV, Limantsev AA., Xuanzhen Song. On the Issue of Determining the Tensile Elastic Modulus of Moso Bamboo. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):77–83. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-77-83

Введение. В практике современного зарубежного проектирования и строительства обоснованный интерес вызывает бамбук как альтернативный экологический материал 21 века. Большое количество работ посвящено исследованиям физико-механических свойств бамбуков, способов узловых соединений стержней из бамбука. Благодаря известным архитекторам и конструкторам бамбук подтвердил свои технические и эстетические преимущества при возведении сооружений различного назначения [1–3, 6, 8, 16, 17].

Основные «бамбуковые» страны — это Китай, Индия, Мьянма, Тайланд, Бангладеш, Камбоджа, Вьетнам, Япония, Индонезия, Малайзия, Филиппины, в которых бамбук в качестве конструкционного материала, благодаря своим преимуществам и оригинальным свойствам, набирает популярность в современной строительной сфере. В местах естественного произрастания древовидные бамбуки имеют широкое применение на протяжении веков. Из них возводят здания, сооружения, мосты, изготавливают водопроводные трубы, мебель, музыкальные инструменты, оружие и даже употребляют в пищу. С развитием современных технологий обработки бамбук находит широкое применение в строительной отрасли. Бамбук используют как целиком, в виде стволов с минимальной обработкой, так и после процесса механической обработки. Бамбук применяют для декорирования помещений в восточном стиле — стены, полы, потолки, элементы обустройства и мебель. Из бамбуковой древесины изготавливают плиты и доски. Также бамбук можно использовать в качестве кровельного материала: разработана технология реза с получением бамбуковой черепицы при условии нанесения защитных покрытий.

Физико-механические свойства бамбуков зависят от следующих факторов: географического местоположения произрастания, рода и вида бамбука, строения ствола, плотности, влагосодержания. При этом прочность на растяжение, сжатие, а также модуль упругости сухого бамбукового материала выше, чем свежего[1] [4, 5, 9, 10–13].

Результаты исследований физико-механических свойств различных видов бамбуков, проведенных учеными разных стран, в настоящее время позволяют объединить их в три издания ISO (международная организация по стандартизации), касающиеся строительных норм и правил применения бамбуков в строительстве[2,3] [14, 15]. Следует отметить, что по конструкциям из дерева в настоящий момент имеется более 300 нормативных документов и руководств по расчету и изготовлению. Это указывает на существенное отставание в выпуске руководств по использованию бамбука как конструкционного материала в строительстве. Также отсутствуют технические условия и характеристики отдельных видов бамбука по сортовым группам, отсутствуют характеристики поведения бамбука по изменениям прочности и устойчивости при пожаре.

Материалы и методы. На выбор материала для испытаний повлиял тот факт, что в природе выявлено более 1600 видов бамбука, из них наибольшее распространение получил бамбук Мосо, обладающий высокими механическими свойствами и привлекательным внешним видом. В результате изучения процесса роста бамбука Мосо установлено: период роста составляет 4–6 лет, диаметр стебля достигает 10–15 см, толщина стенок стебля бамбука варьируется от 9 до 12 мм, плотность находится в пределах 0,626–0,81 г/см^3.

Рассмотрение макроструктуры бамбука позволяет выявить три части: внешний слой бамбука, основные ткани и внутренний слой. Внешний слой бамбука имеет плотные сосудистые пучки с высоким содержанием волокон. Эту часть структуры можно охарактеризовать такими механическими свойствами, как плотность, твердость, прочность и высокий модуль упругости, что делает бамбук схожим со стеклопластиком.

Бамбуковый внутренний слой имеет небольшое количество сосудистых пучков и более тонкие клетки. За исключением небольшого количества сосудистых пучков они обеспечивают более высокую прочность, другие же свойства бамбука схожи со свойствами древесины. Но у него есть явные преимущества, а именно: стабильность размеров тонкостенных клеток, поэтому в результате получается прочный и водоустойчивый материал.

Подобный подход к рассмотрению бамбука и древесины как природных полимеров позволяет использовать при определении механических характеристик бамбука методики, применяемые к испытаниям древесины и конструкционных пластмасс.

Основываясь на рекомендациях ГОСТ 21554.5-78 «Пиломатериалы и заготовки. Метод определения предела прочности при продольном растяжении», к испытаниям было подготовлено пять бамбуковых образцов. В силу природных особенностей бамбука геометрические размеры образцов соответствуют требованиям ГОСТ только в одной плоскости. Размер по высоте образцов h регламентирован толщиной стенки стебля бамбука, кроме того, сечение образцов имеет лоткообразную форму. Для осуществления надежного крепления образца в захватных устройствах растягивающего механизма предлагается усиление лопаток образца эпоксидной композицией.

При изготовлении образцов было учтено то обстоятельство, что «суставы», расположенные по длине стебля бамбука, размещались в зонах захватных устройств. По результатам испытаний, приведенных в [7], определено, что образцы без «суставов» и с «суставом» в середине образца имеют различную прочность. Образцы с «суставом» показали прочность на растяжение на 2,4 % больше, чем без «суставов». Разрушение в 90 % случаев произошли по сечению без «сустава». Это обстоятельство было учтено в изготовленных образцах путем исключения наличия «суставов» в рабочей зоне образцов.

При изготовлении образцов в связи с малыми размерами поперечных сечений рабочей зоны радиусом кривизны поверхности исходных заготовок можно пренебречь, считая сечение прямоугольным с размерами $b \times h$. На основании замеров параметров исходных заготовок бамбука и после их механического раскроя и обработки определяются геометрические характеристики сечения образцов, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики сечения образцов бамбука

№ п/п образца, $i = 1 \ldots 5$	Ширина образца, b_i, см	Высота образца, h_i, см	Площадь поперечного сечения образца $F_i = b_i \times h_i$, см^2
1	0,47	0,48	0,2256
2	0,41	0,41	0,1681
3	0,42	0,41	0,1722
4	0,48	0,48	0,2304
5	0,48	0,50	0,24

[1] JG/T199-2007. Testing methods for physical and mechanical properties of bamboo used in building.
[2] ISO/TR. 22157-1. Bamboo — Determination of physical and mechanical properties — Part 1: Requirement.
[3] ISO/TR. 22157-2. Bamboo — Determination of physical and mechanical properties — Part 2: Laboratory Manual.

На основании рекомендаций по испытанию конструкционных пластмасс для проведения испытаний с целью экспериментального определения модуля упругости бамбука Мосо при растяжении также была подготовлена серия из пяти бамбуковых образцов (i = 6…10).

Стандартные образцы на растяжение из конструкционных пластмасс имеют некоторые недостатки. Головка (лопатка) образца обычно при помощи парных клиньев зажимается в захватах испытательной машины. В процессе нагружения образцы вблизи зажимов кроме напряжений растяжения испытывают напряжения сжатия в поперечном направлении. Таким образом, испытываемый образец по длине нагружен неравномерно и больше всего вблизи зажимов. При испытании высокопрочных пластмасс (СВАМ, АГ-4С, ДСП и других) образцы либо вытягиваются из зажимов, либо разрушаются не в рабочей зоне, а в головке (лопатке). Для исключения указанных недостатков предлагались различные виды образцов. В частности, для испытания высокопрочных пластмасс применяется стандартный образец с усиленной головкой (лопаткой). Головка (лопатка) стандартного образца с обеих сторон оклеивается стеклохолстом ХЖК в один слой или ВВ в два слоя на полиэфирной смоле ПН.

Если плотность образцов рассматриваемого типа меньше 0,15 г/см^3, то головки образца должны быть срезаны под острым углом и усилены накладками, приклеенными клеем ВИАМ-Б3 к срезанным местам. Эти накладки, имеющие форму трехгранных призм, изготавливают из сухой древесины или пенопласта, плотность которого больше плотности испытываемого образца не менее, чем на 0,1 г/см^3.

При испытании древесины при продольном растяжении допускается применять образцы, состоящие из призмы сечением 4×20 мм и длиной 350 мм и приклеенных к ее концам двусторонних боковых накладок толщиной 8 мм и формой в соответствии с ГОСТ 16483.23-73 «Древесина. Метод определения предела прочности при растяжении вдоль волокон».

В соответствии с вышесказанным для осуществления надежного крепления образцов в захватных устройствах установки, создающей продольное растяжение, и для образцов по аналогии с древесиной, и для образцов по аналогии с конструкционными пластмассами выполняется усиление головок (лопаток) бамбуковых образцов эпоксидной композицией. Для этого заготовленные образцы размещаются в специальных формах, в которых выполняется омоноличивание головок (лопаток) образца. Таким образом, получаются образцы для проведения испытаний на продольное растяжение по аналогии с древесиной (первый тип) и конструкционными пластмассами (второй тип).

Для повышения надежности закрепления образцов в захватах испытательной установки на лопатки образцов обоих типов (аналог древесины и аналог пластмасс) при помощи эпоксидной композиции наклеены полосы наждачной бумаги. Это условие принято также в связи с тем, что длина лопаток образцов второго типа (аналог пластмасс) составляет 60 мм (в отличие от длины лопаток образцов первого типа (аналог древесины) — 100 мм). Повышение сцепления за счет наклейки наждачной бумаги на лопатки образцов позволяет эффективно использовать захваты при испытании образцов обоих типов.

На основании замеров параметров исходных заготовок бамбука и после их механического раскроя на образцы второго типа определяются геометрические характеристики сечения образцов, которые приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики сечения образцов бамбука после раскроя

№ п/п образца, i = 6…10	Наружный диаметр/ радиус D_i/R_i, см	Внутренний диаметр/ радиус d_i/r_i, см	Высота образца $h_i=R_i-r_i$, см	Ширина образца, b_i, см	$\alpha_i=\frac{r_i}{R_i}$	Площадь поперечного сечения образца F_i, см^2
6	2,99/1,495	2,39/1,195	0,3	1,5	0,799	0,424
7	2,88/1,44	2,26/1,13	0,31	1,47	0,785	0,426
8	3,30/1,165	2,66/1,33	0,32	1,42	0,806	0,424
9	3,59/1,795	2,69/1,345	0,45	1,52	0,749	0,617
10	3,45/1,725	2,81/1,405	0,32	1,48	0,814	0,444

Результаты исследования. Для определения модуля упругости бамбука при растяжении была разработана и изготовлена экспериментальная установка, состоящая из двух захватов, в которые помещается испытываемый образец. Верхний захват представляет собой две стальные пластины из полосы 40×4 мм, между которыми располагается верхняя лопатка образца, усиленная омоноличиванием эпоксидной композицией, с наклеенными полосками наждачной бумаги. Стальные пластины стягиваются системой болтов, обеспечивая надеж-

ное закрепление верхней лопатки образца. Для увеличения сцепления образца с захватами на внутренние поверхности пластин также наклеены полосы наждачной бумаги. Образивная поверхность обращена в сторону образца. Между двумя стальными пластинами захвата размещается третья пластина, соединенная болтом с пластинами верхнего захвата установки. Третья пластина предназначена для осуществления подвеса верхнего захвата. Аналогично с решением верхнего захвата выполняется конструкция нижнего захвата установки (симметрично относительно горизонтальной поперечной оси образца). Через третью пластину нижнего захвата производится приложение испытательной нагрузки посредством стальной тяги с нагрузочной платформой, на которую укладываются тарированные штучные грузы.

Для определения величины абсолютного удлинения базы образца при растяжении используются контактные прогибомеры, в качестве которых применены два индикатора часового типа фирмы «Mitutoyo» (Япония).

Обсуждение и заключение. Модуль упругости каждого образца вычисляют по формуле:

$$E_{p,i} = \frac{\Delta P \cdot l}{\Delta l \cdot F_i},$$

где ΔP — приращение нагрузки; l — база образца; F_i — площадь поперечного сечения образца; Δl — среднее арифметическое из приращений деформации, вычисленное по данным трех последних замеров; $i = 1\ldots5, 6\ldots10$ — номер образца.

За результат испытаний принимают среднее арифметическое значение модуля упругости испытываемых образцов и среднее квадратичное отклонение результатов модуля упругости, которые вычисляют по формулам:

$$\mathrm{E_p} = \frac{\sum_{i=1}^{5} \mathrm{E}_{p,i}}{i};$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{5} (\mathrm{E}_{p,i} - \mathrm{E}_p)^2}{i-1}}.$$

Анализ полученных результатов испытаний бамбука Мосо при растяжении позволяет сделать вывод о достоверном совпадении экспериментальных значений модуля упругости при растяжении с известными в технической литературе значениями [7].

Список литературы

1. Алямовский А.А. *Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation.* Москва: ДМК Пресс; 2010. 161 с.
2. Verzhbovsky G., Skuratov S., Shutskiy S. On Determining the Elasticity Modulus of Moso Bamboo Based on the Static Bend Test Results by Analogy with Wood and Engineering Plastics. *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. NN 2022. Lecture Notes in Networks and Systems.* 2022;510:1941–1948. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_200
3. Крицин А.В., Лихачева С.Ю., Торопов А.С., Лобов Д.М., Тихонов А.В. Исследования на прочность малоразмерных образцов из бамбукового композита. *Приволжский научный журнал.* 2014;3:26–30
4. Skuratov S., Danilova-Volkovskaya G., Yanukyan E., Beilin M. Bamboo as a Unique Ecological Building Material of the XXI Century: Bamboo Description, Bamboo Physical and Mechanical Properties Studies. *Materials Science Forum.* 2021;1043:149–154. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.149
5. Соланилья Медина Й.М. Архитектурное проектирование из бамбука как экологического альтернативного материала XXI века. *Architecture and Modern International Technologies.* 2018;1(42):201–211. URL: https://marhi.ru/AMIT/2018/1kvart18/15_solanilla_medina/index.php (дата обращения: 17.07.2023)
6. Яо Вэй. *Разработка и расчет узловых соединений несущих пространственных стержневых конструкций из бамбука.* Дис. канд. тех. наук. Санкт-Петербург; 2015. 163 с.
7. Яо Вэй, Шмидт А.Б. Применение бамбука в строительстве. *Вестник гражданских инженеров.* 2013;2(37):71–75.
8. Bai Wenfeng, Jue Liu. Protection and Revival of the Dai. *Industrial Architecture, Beijing.* 2007;37:38–411.
9. Sharma B., Gatóo A., Bock M., Mulligan H., Ramage M. Engineered Bamboo: State of the Art. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Construction Materials.* 2015;168(2):57–67. https://doi.org/10.1680/coma.14.00020
10. Awalluddin D., Mohd Ariffin M., Osman M., Hussin M., Ismail M., Lee H., et al. Mechanical Properties of Different Bamboo Species. In: *Proceedings of the 6th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF 2017). MATEC Web of Conferences. Volume 138.* Seoul: EDP Sciences Publ.; 2017. P. 01024. https://doi.org/10.1051/matecconf/201713801024
11. Xu Q., Harries K., Li X., Liu Q., Gottron J. Mechanical Properties of Structural Bamboo Following Immersion in Water. *Engineering Structures.* 2014;81:230–239. https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2014.09.044
12. Xie Hao. Research on the Use of Bamboo in Construction, Housing infrastructure of China. Guangdong.

13. Sharma B., Gatoo A., Ramage M. Effect of Processing Methods on the Mechanical Properties of Engineered Bamboo. *Construction and Building Materials.* 2015;83: 95–101. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.048

14. *Bamboo Houses of the Dai People.* Electronic Library of the Bai Du Website. URL: http://wenku.baidu.com/link?url=aKrTKUVvpcCT25B7XDHwX1JMtURym85kiNpLNOXIDomHWiJ3xoD-KREWz21w-PMY3dOp165DYE3bKDLib22yAHFD3C43QVDww_HN501xwdEg (дата обращения 13.11.2023).

15. *Development and Application of Bamboo.* Electronic Library of the Bai Du Website. URL: http://wenku.baidu.com/link?url=i9n_w218Y72aYGxfUHyqPZsrHW6478aL-KyCA_7zRcKQpFoeFLbhwdMZO1TrRshHvR5mmYEr4GG15M8wWm3kus_khGRJ72UMBiIL1Ftj5ZRS (дата обращения 13.11.2023).

16. *The Use of Bamboo Structures.* Electronic Library of the Bai Du Website. URL: http://wenku.baidu.com/link?url=d3Lk3YAO4fL2LkHRNu6JR81qNcdOsWet3B3-3FDW1T4UZFfodUd3mSdWp9WmkPw1albfrDOy8MLDHX8PmWmiaAHf3Q-GufhmnPrLSs2-cV3 (дата обращения 13.11.2023).

17. Lapina AP, Zakieva NI. Bamboo in Modern Construction and Architecture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1083:012019. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1083/1/012019

References

1. Alyamovsky AA. *Engineering Calculations in SolidWorksSimulation*. Moscow: DMK Press; 2010. 161 p. (In Russ.).

2. Verzhbovsky G, Skuratov S, Shutskiy S. On Determining the Elasticity Modulus of Moso Bamboo Based on the Static Bend Test Results by Analogy with Wood and Engineering Plastics. *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. NN 2022. Lecture Notes in Networks and Systems.* 2022;510:1941–1948. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_200

3. Kritsin AV, Likhacheva SYu, Toropov AS, Lobov DM, Tikhonov AV. Research on Strength of Small Samples of Bamboo Composite. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2014;3:26–30 (In Russ.).

4. Skuratov S, Danilova-Volkovskaya G, Yanukyan E, Beilin M. Bamboo as a Unique Ecological Building Material of the XXI Century: Bamboo Description, Bamboo Physical and Mechanical Properties Studies. *Materials Science Forum.* 2021;1043:149–154. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.149

5. Solanilla Medina Y.M. Architectural Design from Bamboo as an Ecological Alternative Material of the XXI Century. *Architecture and Modern International Technologies*. 2018;1(42):201–211. URL: https://marhi.ru/AMIT/2018/1kvart18/15_solanilla_medina/index.php (accessed: 17.07.2023) (In Russ.).

6. Yao Wei. *Development and Calculation of Nodal Connections of Load-Bearing Spatial Rod Structures Made of Bamboo*. Cand.Sci. (Engineering) Dissertation. Saint Petersburg; 2015. 163 p.

7. Yao Wei, Schmidt AB. Application of Bamboo in Construction. *Bulletin of Civil Engineers*. 2013;2(37):71–75.

8. Bai Wenfeng, Jue Liu. Protection and Revival of the Dai. *Industrial Architecture, Beijing.* 2007;37:38–411.

9. Sharma B, Gatóo A, Bock M, Mulligan H, Ramage M. Engineered Bamboo: State of the Art. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Construction Materials.* 2015;168(2):57–67. https://doi.org/10.1680/coma.14.00020

10. Awalluddin D, Mohd Ariffin M, Osman M, Hussin M, Ismail M, Lee H, et al. Mechanical Properties of Different Bamboo Species. In: *Proceedings of the 6th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF 2017). MATEC Web of Conferences. Volume 138.* Seoul: EDP Sciences Publ.; 2017. P. 01024. https://doi.org/10.1051/matecconf/201713801024

11. Xu Q., Harries K., Li X., Liu Q., Gottron J. Mechanical Properties of Structural Bamboo Following Immersion in Water. *Engineering Structures.* 2014;81:230–239. https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2014.09.044

12. Xie Hao. Research on the Use of Bamboo in Construction. Housing Infrastructure of China. Guangdong.

13. Sharma B, Gatoo A, Ramage M. Effect of Processing Methods on the Mechanical Properties of Engineered Bamboo. *Construction and Building Materials.* 2015;83: 95–101. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.048

14. *Bamboo Houses of the Dai People.* Electronic Library of the Bai Du Website. URL: http://wenku.baidu.com/link?url=aKrTKUVvpcCT25B7XDHwX1JMtURym85kiNpLNOXIDomHWiJ3xoD-KREWz21w-PMY3dOp165DYE3bKDLib22yAHFD3C43QVDww_HN501xwdEg (accessed: 13.11.2023).

15. *Development and Application of Bamboo.* Electronic Library of the Bai Du Website. URL: http://wenku.baidu.com/link?url=i9n_w218Y72aYGxfUHyqPZsrHW6478aL-KyCA_7zRcKQpFoeFLbhwdMZO1TrRshHvR5mmYEr4GG15M8wWm3kus_khGRJ72UMBiIL1Ftj5ZRS (accessed: 13.11.2023).

16. *The Use of Bamboo Structures.* Electronic Library of The Bai Du Website. URL: http://wenku.baidu.com/link?url=d3Lk3YAO4fL2LkHRNu6JR81qNcdOsWet3B3-3FDW1T4UZFfodUd3mSdWp9WmkPw1albfrDOy8MLDHX8PmWmiaAHf3Q-GufhmnPrLSs2-cV3 (accessed: 13.11.2023).

17. Lapina AP, Zakieva NI. Bamboo in Modern Construction and Architecture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1083:012019. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1083/1/012019

Поступила в редакцию 28.08.2023
Поступила после рецензирования 13.09.2023
Принята к публикации 19.09.2023

Об авторах:

Скуратов Сергей Викторович, доцент кафедры «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, svskuratov@yandex.ru

Щуцкий Сергей Викторович, заведующий кафедрой «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, svpike1@rambler.ru

Лиманцев Алексей Алексеевич, старший преподаватель кафедры «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, alimantsev@gmail.com

Сюаньчжень Сун, аспирант кафедры «Сопротивление материалов» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, songxuanzhen_9@live.com

Заявленный вклад соавторов:

Скуратов С.В. — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, доработка текста, корректировка выводов.

Щуцкий С.В. — подготовка текста, формирование выводов.

Лиманцев А.А. — подготовка текста, формирование выводов.

Сун Сюаньчжень — подготовка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 28.08.2023
Revised 13.09.2023
Accepted 19.09.2023

About the Authors:

Sergey V. Skuratov, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Metal, Wood and Plastic Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, svskuratov@yandex.ru

Sergey V. Shchutsky, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Metal, Wood and Plastic Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, svpike1@rambler.ru

Aleksey A. Limantsev, Senior Lecturer of the Metal, Wood and Plastic Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, alimantsev@gmail.com

Song Xuanzhen, PhD student of the Strength of Materials Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, songxuanzhen_9@live.com

Claimed contributorship:

Skuratov SV — formulating the main concept, aim and objective of the study, refining the text, correcting the conclusions.

Shchutsky SV — text preparation, formulating the conclusions.

Limantsev AA — text preparation, formulating the conclusions.

Song Xuanzhen — text preparation, formulating the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА



Check for updates

Научная статья

УДК 519.693.54

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-84-93

Математическое моделирование технологических процессов бетонирования монолитных конструкций из мелкозернистых смесей

Л.И. Касторных ✉, **М.А. Гикало**, **А.В. Каклюгин**, **И.А. Серебряная**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ likas9@mail.ru

Аннотация

Введение. Внедрение инновационных технологий и материалов в строительной отрасли сдерживается по ряду причин, связанных с недостаточной изученностью технологических процессов и повышенной стоимостью высокоэффективных инновационных материалов. Поэтому исследования в области технологии монолитного бетона, отражающие особенности бетонирования конструкций из самоуплотняющихся смесей и направленные на снижение их себестоимости за счет применения строительных отходов, являются актуальными. Целью настоящей работы является экспериментально-статистическое моделирование реологических характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей и физико-механических свойств бетонов в зависимости от влияния двух рецептурных факторов — расхода суперпластифицирующей добавки и гранулометрического состава заполнителя, включающего строительные отходы.

Материал и методы. Для приготовления мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей использовали портландцемент ЦЕМ 0 52,5Н, песок природный кварцевый и песок из дроблёного бетона смеси трех фракций 0,63–5,0 мм и химическую добавку — суперпластификатор на основе эфиров поликарбоксилатов Полипласт ПК. Технологические характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся смесей (удобоукладываемость, вязкость, текучесть) определяли по стандартным методикам. Предельные напряжения сдвига смесей устанавливали с помощью прибора, включающего цилиндр с насадкой и стеклянное основание с разметкой окружностей. Моделирование реологических и физико-механических свойств мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов осуществлялось с применением двухфакторного симплекс-суммированного плана на шестиугольнике, вписанном в окружность, являющегося одним из наиболее удобных для решения технологических задач строительного материаловедения.

Результаты исследования. Получены экспериментально-статистические модели реологических характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся смесей и прочностных свойств бетона, адекватно описывающие экспериментальные данные.

Обсуждение и заключение. Применение методов математического планирования эксперимента позволило комплексно оценить влияние двух наиболее значимых рецептурных факторов на технологические процессы бетонирования монолитных железобетонных конструкций из мелкозернистых самоуплотняющихся смесей с использованием заполнителя из строительных отходов. Установлено, что оптимальное содержание зерен из дробленого бетона в природном песке составляет 30–35 %, а дозировка суперпластификатора Полипласт ПК — 1,2–1,25 % массы вяжущего.

Ключевые слова: мелкозернистый самоуплотняющийся бетон, суперпластификатор на основе поликарбоксилатов, рециклинг строительных отходов, математическое планирование, экспериментально-статистические модели, регрессионный анализ

Для цитирования. Касторных Л.И., Гикало М.А., Каклюгин А.В., Серебряная И.А. Математическое моделирование технологических процессов бетонирования монолитных конструкций из мелкозернистых смесей. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):84–93. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-84-93

Original article

Mathematical Modeling the Process of Concreting the Monolithic Structures Made of the Fine-Grained Mixes

Lyubov I. Kastornykh ✉, **Maksim A. Gikalo**, **Alexander V. Kaklyugin**, **Irina A. Serebryanaya**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ likas9@mail.ru

Abstract

Introduction. Implementation of the innovative technologies and materials into construction industry is constrained due to a number of reasons related to the insufficiently well studied production processes of the highly efficient innovative materials and their high cost. Therefore, studying the production process of the monolithic concrete structures, which is bearing the features of concreting the structures made of the self-compacting mixes and is targeting the prime cost reduction by using the construction waste, is relevant. The research aims at experimental and statistical modeling the dependence of the rheological properties of the fine-grained self-compacting concrete mixes and physical and mechanical properties of concretes on two recipe factors — consumption of superplastifying additive and grain-size composition of an aggregate containing the construction waste.

Materials and Methods. To prepare the fine-grained self-compacting concrete mixes, the Portland cement CEM 0 52,5N, natural quartz sand, crushed concrete sand mixed of three fractions 0.63–5.0 mm and a chemical additive — an ester-based polycarboxylate superplasticizer Polyplast PK, were used. The technological properties of the fine-grained self-compacting mixes (workability, viscosity, fluidity) were determined using the standard methods. The shear yield stress for the mixes was determined by means of an instrument consisting of a cylinder with a mouth and a glass base with marked circumferences. Modeling the rheological and physical-mechanical properties of the fine-grained self-compacting concretes was carried out based on the two-factor simplex sum mathematical planning visualised in a hexagon figure inscribed in a circle, which is one of the most appropriate methods of solving the technological problems in the construction materials science.

Results. The experimental-statistical models of the rheological properties of the fine-grained self-compacting mixes and strength properties of concrete were obtained, providing the adequate description of the experiment data.

Discussion and Conclusion. The mathematical planning used in the experiment made it possible to comprehensively assess the influence of two most significant recipe factors on the process of concreting the monolithic reinforced concrete structures made of fine-grained self-compacting mixes using the aggregate from the construction waste. It was determined that the optimal content of the crushed concrete grains in natural sand was 30–35 %, and proportion of the superplasticizer Polyplast PK was 1.2–1.25 % to the weight of binder.

Keywords: fine-grained self-compacting concrete, polycarboxylate superplasticizer, recycling of construction waste, mathematical planning, experimental-statistical models, regression analysis

For citation. Kastornykh LI, Gikalo MA, Kaklyugin AV, Serebryanaya IA. Mathematical Modeling the Process of Concreting the Monolithic Structures Made of the Fine-Grained Mixes. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):84–93. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-84-93

Введение. В строительном комплексе Российской Федерации для реализации проектов уникальных объектов и прежде всего высотного жилья из монолитного бетона востребованы нестандартные инновационные строительные технологии и материалы. Масштабное внедрение инновационных технологий и материалов в строительном производстве в настоящее время всё ещё сдерживается рядом ограничений [1]. Это связано с недостаточной изученностью технологических процессов, а также более высокой стоимостью новых материалов по сравнению с традиционно применяемыми.

Инновационные технологии в монолитном строительстве неразрывно связаны с бетононасосным принципом транспортирования и укладки самоуплотняющихся смесей. Применение такого технологического приема обеспечивает значительное сокращение сроков строительства рядовых объектов, а при возведении уникальных сооружений и высотных зданий часто является единственно возможным [2].

В ряде случаев, в частности для бетонирования густоармированных и тонкостенных конструкций, требуется использование мелкозернистых самоуплотняющихся смесей. В нормативной документации (ГОСТ 27006-2019 «Бетоны. Правила подбора состава», ГОСТ Р 59714-2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия», методическое пособие «Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов») проектирование составов самоуплотняющихся бетонов представлено общими положениями, а описание методики подбора составов мелкозернистых самоуплотняющихся смесей отсутствует. Сырьевая база мелкого заполнителя Ростовской области представлена песками, относящимися по зерновому составу к мелким и очень мелким. Использовать местные пески для бетонирования многих конструкций, а особенно высокопрочных, недопустимо. В таких случаях необходимо улучшать гранулометрию заполнителя, обогащая его более крупными зернами размерами от 1,25 до 5,0 мм. В практических условиях мелкие пески обогащают, используя отсевы камнедробления. Альтернативой природным материалам могут быть мелкие заполнители, получаемые дроблением строительных отходов. Рециклинг заполнителей из дробленого бетона, обоснованный ГОСТ 32495-2013 «Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона», является решением актуальной экологической задачи, связанной с большим количеством накопленных строительных отходов [3, 4].

Выполненные исследования в области самоуплотняющихся смесей с техногенными отходами показали, что свойствами самоуплотнения могут обладать смеси, получаемые при использовании суперпластификаторов на основе эфиров поликарбоксилатов или полиарилов [5, 6]. Такие химические модификаторы, весьма чувствительные к минералогическому составу вяжущего и другим тонкодисперсным минеральным компонентам смеси, принимают участие в формировании структуры и свойств цементного камня [7, 8]. Поэтому в производственных условиях выпуску самоуплотняющихся смесей должны предшествовать исследования о совместимости суперпластификаторов с материалами, используемыми для приготовления бетона [9–11].

На технологические характеристики самоуплотняющихся смесей и физико-механические показатели бетона оказывает влияние множество факторов, которые необходимо оптимизировать на стадии проектирования состава бетона и разработки проекта производства работ [12, 13]. При подборе состава бетонной смеси с использованием дробленых зерен из строительных отходов и высокоэффективных суперпластификаторов и назначении технологических параметров бетонирования монолитных конструкций требуется научное сопровождение [14, 15]. Поэтому целью настоящей работы явилась оценка и анализ влияния зернового состава заполнителя и поликарбоксилатного суперпластификатора на реологические характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся смесей и физико-механические свойства бетона на основе методов математического планирования эксперимента.

Материалы и методы. В исследованиях для определения рациональной дозировки химического модификатора применяли добавку Полипласт ПК — универсальный суперпластификатор на основе эфиров поликарбоксилатов для товарного бетона и сборных железобетонных конструкций, используемый по рекомендациям производителя для регулирования сохраняемости бетонных смесей при одновременном быстром наборе ранней прочности бетона.

Для приготовления мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей использовали бездобавочный портландцемент ЦЕМ 0 52,5Н, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия»:

– прочность на сжатие в возрасте 28 сут. — 63,3 МПа;
– прочность на сжатие после тепловой обработки — 48,2 МПа;
– нормальная густота цементного теста — 27,8 %;
– удельная поверхность — 382,5 м^2/кг.

Минералогический состав портландцемента приведен в таблице 1.

Таблица 1

Минералогический состав портландцемента

Тип и класс цемента	Состав, %						
	C3S	C2S	C3A	C4AF	SO3	MgO	R2O
ЦЕМ 0 52,5Н	60,9	11,9	7,1	12,1	3,01	1,07	0,84

В составе мелкого заполнителя использовали:

– песок природный кварцевый, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ»: истинная плотность 2650 кг/м^3, насыпная плотность 1410 кг/м^3, модуль крупности 1,15 (группа — очень мелкий), пустотность 46,6 %;

– песок из дроблёного бетона, соответствующий требованиям ГОСТ 32495-2013, смеси трех фракций: 0,63–1,25 мм, 1,25–2,5 мм, 2,5–5,0 мм в соотношении по массе 20:30:50 соответственно.

Технологические характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей — удобоукладываемость, текучесть, вязкость — определяли по методикам ГОСТ Р 59715-2022 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний».

Вязкость смеси t500 устанавливали, фиксируя время, за которое растекающаяся смесь впервые коснется отметки 500-миллиметровой окружности. Текучесть смеси Т определяли методом блокировочного кольца с 12 арматурными стержнями.

Для определения устойчивости смеси к расслаиванию применяли визуальный метод определения стабильности смеси по ГОСТ Р 59715-2022.

Реологическую характеристику смеси — предельные напряжения сдвига — определяли с помощью прибора, включающего цилиндр с насадкой и стеклянное основание с разметкой окружностей (рис. 1).




Рис. 1. Прибор для определения предельного напряжения сдвига бетонной смеси

Расчет предельных напряжений сдвига бетонных смесей τ_o, Н/м^2, выполняли по формуле, апробированной исследователями [16]:

$$\tau_o = \left(\frac{h \times d^2}{k \times D^2}\right) \times \rho,$$

где h, d — высота и диаметр, м, соответственно цилиндра; ρ — средняя плотность бетонной смеси, кг/м^3; D — диаметр расплыва бетонной смеси, м; $k = 2$ (по [16]).

Из смеси каждого состава готовили контрольные образцы-кубы с номинальным размером ребра 100 мм. Хранение и испытание образцов бетона выполняли по методике ГОСТ 10180.

Для оценки реологических и физико-механических свойств мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов (МСУБ) реализован эксперимент, квадратичная модель которого имеет вид:

$$Y_i = b_0 + b_1 \times x_1 + b_2 \times x_2 + b_{11} \times x_1^2 + b_{22} \times x_2^2 + b_{12} \times x_1 \times x_2,$$

где Y_i — исследуемое свойство; x_1, x_2 — варьируемые факторы; b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12} — коэффициенты регрессии.

Для получения квадратичной модели принят двухфакторный симплекс-суммированный план на шестиугольнике, вписанном в окружность, который является одним из наиболее удобных при решении ряда рецептурных и технологических задач строительного материаловедения [17].

Результаты исследования. В качестве факторов, в наибольшей степени влияющих на реологические и физико-механические свойства МСУБ, приняты:

– X_1 — содержание зерен дробленого бетона в природном мелком заполнителе;

– X_2 — дозировка суперпластификатора Полипласт ПК.

Условия проведения эксперимента — исследованные факторы и интервалы их варьирования — представлены в таблице 2, а план эксперимента и натуральные значения переменных в каждой точке плана — в таблице 3.

Таблица 2

Исследуемые факторы и интервалы их варьирования

Код	Значение кода	Исследуемые факторы	
		X_1	X_2
Основной уровень X_{i0}	0	30	1,0
Интервал варьирования ΔX_i	x	10	0,5
Верхний уровень $X_{i\,max}$	+1	40	1,5
Нижний уровень $X_{i\,min}$	–1	20	0,5

Таблица 3

План эксперимента и натуральные значения переменных

Точка плана	План			
	в кодированном выражении		в натуральном выражении	
	X_1	X_2	x_1 содержание зерен дробленого бетона в природном песке, %	x_2 дозировка суперпластификатора Полипласт ПК, %
1	–1	0	20	1,0
2	+1	0	40	1,0
3	+0,5	+0,87	35	1,435
4	+0,5	–0,87	35	0,565
5	–0,5	+0,87	25	1,435
6	–0,5	–0,87	25	0,565
7	0	0	30	1,0

Для соблюдения условий сопоставимости эксперимента стабилизированы следующие факторы:

– расход цемента (Ц ~ 510 кг/м^3);

– растекаемость смесей (готовили мелкозернистые самоуплотняющиеся смеси марки по удобоукладываемости РК1 по ГОСТ Р 59714-2021).

В качестве откликов приняты реологические характеристики смесей и прочностные свойства бетонов:

– Y_1 — вязкость смеси t500, с;

– Y_2 — текучесть смеси с блокирующим кольцом Т, мм;

– Y_3 — предельные напряжения сдвига смеси τ_o, Н/м^2;

– Y_4 — предел прочности бетона при сжатии в возрасте 1 сут. R1, МПа;

– Y_5 — предел прочности бетона при сжатии в возрасте 28 сут. R28, МПа.

Для экспериментальных исследований готовили мелкозернистые самоуплотняющиеся смеси, показатели конструктивности и визуальное описание которых представлены в таблице 4.

Таблица 4

Показатели конструктивности и характеристики мелкозернистых смесей

Точка плана	Расход материалов на 1 м^3, кг			В/Ц	Средняя плотность смеси, кг/м^3	Визуальная оценка смеси
	Песок природный	Песок дробленый	Добавка			
1	1093	274	5,1	0,49	2128	Стабильная, но быстро загустевает
2	855	570	5,3	0,47	2208	Нестабильная с заметным водоотделением
3	933	502	7,6	0,45	2215	Стабильная, незначительное отделение цементного теста
4	907	488	2,95	0,54	2195	Стабильная, но сразу растекается
5	1052	351	7,4	0,49	2185	Стабильная, незначительное отделение цементного теста
6	960	319	2,7	0,69	2082	Стабильная, но сразу растекается
7	965	414	5,1	0,49	2145	Стабильная с вязким течением

В процессе визуального наблюдения за характером растекаемости смеси при определении расплыва нормального конуса установлено значительное влияние исследуемых факторов на стабильность смеси.

Рассчитанные методом наименьших квадратов значимые коэффициенты регрессии полученных экспериментально-статистических моделей (ЭС-моделей) вышеперечисленных свойств смеси и МСУБ приведены в таблице 5.

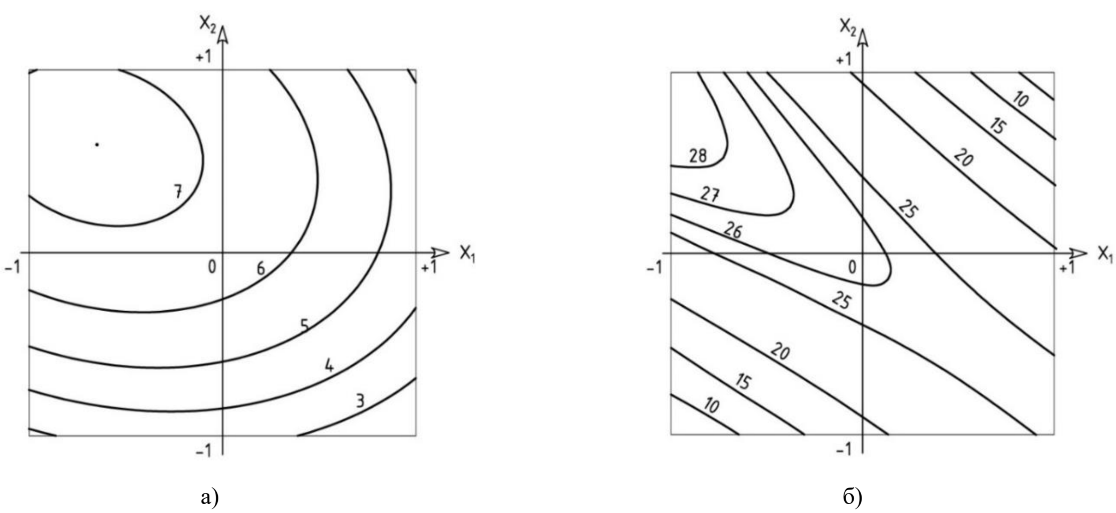
Таблица 5

ЭС-модели реологических и прочностных свойств МСУБ

Исследуемое свойство	Коэффициенты регрессии					
	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
Y_1 — вязкость смеси t500, с	6,500	–1,033	1,552	–1,033	–1,612	–0,568
Y_2 — текучесть смеси с блокирующим кольцом Т, мм	26,222	–1,500	0,287	–4,056	–7,401	–12,311
Y_3 — предельные напряжения сдвига смеси τ_o, Н/м^2	261,444	–18,222	–30,077	–65,444	–36,952	–60,227
Y_4 — прочность бетона при сжатии в возрасте 1 сут. R1, МПа	21,400	0,678	1,494	–3,083	–8,130	–3,902
Y_5 — прочность бетона при сжатии в возрасте 28 сут. R28, МПа	52,042	4,829	6,961	–3,304	–8,154	–0,582

Проверку адекватности полиномиальных уравнений второго порядка производили по критерию Фишера $F_{экс}$. При выполнении условия $F_{экс.} < F_{табл.}$ уравнение признается адекватным и возможным для получения расчётных значений функций отклика Y.

Графическая интерпретация полученных ЭС-моделей представлена в виде изолиний, построенных по оригинальной программе [18]. Изолинии реологических характеристик смесей в зависимости от исследуемых факторов представлены на рис. 2 и 3.



а) б)

Рис. 2. Изолинии вязкости и текучести мелкозернистых самоуплотняющихся смесей в зависимости от содержания дробленых зерен и дозировки суперпластификатора: а — вязкость, с; б — текучесть, мм

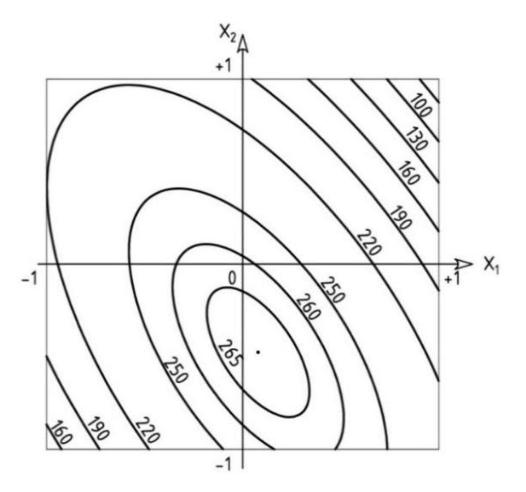


Рис. 3. Изолинии предельных напряжений сдвига, Н/м^2, мелкозернистых смесей в зависимости от содержания дробленых зерен и дозировки суперпластификатора

Анализ полученных моделей реологических свойств мелкозернистых смесей показывает, что влияние исследуемых факторов носит нелинейный характер. На вязкость t500, которая характеризует связное течение смеси и, по мнению авторов, должна находиться в пределах 5–6 с, большее влияние оказывает дозировка суперпластификатора. Получение стабильных нерасслаивающихся смесей требует оптимизации расхода химического модификатора.

Показатель текучести смеси *T*, который должен иметь минимальное значение, в большей степени зависит от содержания дробленых зерен в природном песке. Увеличение количества крупных зерен в мелком заполнителе при оптимальном расходе суперпластификатора способствует снижению показателя текучести мелкозернистой смеси.

Минимальная величина предельных напряжений сдвига τ_o, свидетельствующая о способности смеси перекачиваться по бетоноводам с минимальными энергозатратами, достигается при определенных значениях исследуемых параметров (рис. 3). Для полученной ЭС-модели с учетом визуальных наблюдений стабильности смесей она получается при содержании 35–37 % дробленых зерен в природном песке и расходе суперпластификатора 1,2–1,25 % массы вяжущего.

Совместная оценка ЭС-моделей реологических свойств МСУБ с визуальными наблюдениями (таблица 4) показала, что для обеспечения связности и стабильности смесей оптимальное содержание зерен дробленого бетона в природном заполнителе должно быть в пределах 30–35 % при дозировке суперпластификатора Полипласт ПК 1,2–1,25 % массы цемента.

Графическая интерпретация ЭС-моделей прочности МСУБ в раннем (1 сут.) и проектном возрасте (28 сут.) в зависимости от исследуемых факторов представлена на рис. 4. Анализ ЭС-моделей прочностных характеристик МСУБ также показал нелинейный характер влияния факторов эксперимента. Для достижения максимальной прочности бетона в раннем возрасте *R*1 варьируемые факторы должны находиться на среднем уровне: при содержании дробленых зерен в природном песке 30 % и расходе суперпластификатора 1,0 % массы цемента.

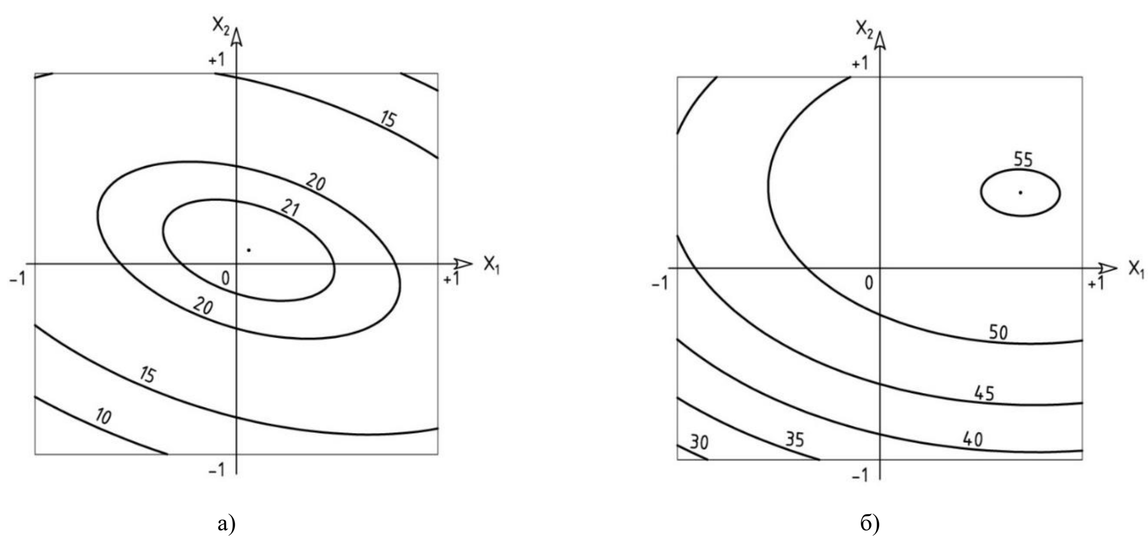


Рис. 4. Изолинии прочности МСУБ, МПа, в зависимости от содержания дробленых зерен и дозировки суперпластификатора: а — в раннем возрасте; б — проектном возрасте

Увеличение расхода суперпластификатора на поликарбоксилатной основе приводит к заметному торможению процессов гидратации цемента и замедлению набора прочности бетона на ранней стадии.

В проектном возрасте максимальная прочность МСУБ R28 достигается при увеличении содержания зерен дробленого бетона в природном заполнителе до 35–37 % и дозировке суперпластификатора Полипласт ПК 1,2–1,25 % массы вяжущего.

Обсуждение и заключение. Реализация эксперимента подтвердила, что проектирование составов мелкозернистого самоуплотняющегося бетона с суперпластификатором на поликарбоксилатной основе и заполнителем, содержащим строительные отходы, требует научного сопровождения. Применение методов математического планирования позволило комплексно оценить влияние рецептурных факторов на технологические процессы бетонирования конструкций из мелкозернистых самоуплотняющихся смесей.

Установлено, что совместный анализ визуального наблюдения и ЭС-моделей реологических характеристик самоуплотняющихся смесей позволяет комплексно оценить влияние исследуемых факторов и определить их рациональную дозировку при проектировании состава бетонных смесей.

Выявлено, что реологические показатели самоуплотняющихся смесей, обладающих связностью и стабильностью, в большей степени зависят от расхода суперпластификатора, а на прочностные характеристики МСУБ большее влияние оказывает содержание зерен из дробленого бетона в природном мелком заполнителе. Установлено, что оптимальное содержание дробленых зерен в природном песке составляет 30–35 %, а дозировка суперпластификатора Полипласт ПК — 1,2–1,25 % массы вяжущего.

Математическое моделирование технологических процессов приготовления, транспортирования и укладки самоуплотняющихся бетонных смесей делает их привлекательными для инвесторов и создает условия для активного внедрения инноваций в монолитном строительстве.

Список литературы

1. Васильева Е.Ю. Значение и перспективы применения инновационных материалов и технологий в жилищном строительстве. *Вестник МГСУ.* 2022;17(11):1586–1593. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.11.1586-1593

2. Османов С.Г., Манойленко А.Ю., Литовка В.В. Выбор вариантов механизации бетонных работ в монолитно-каркасном строительстве. *Инженерный вестник Дона.* 2019;1. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5507 (дата обращения: 02.07.2023).

3. Lopatin N.A., Motornaja A.I., Neguliaeva E.Yu. The Most Effective Crushing Equipment and Testing of Recycled Concrete Aggregates. *Construction of Unique Buildings and Structures.* 2015;10:34–45. https://doi.org/10.18720/CUBS.37.3

4. Гранева А.В. Применение рециклинга в процессе переработки бетона и железобетона. *Инженерный вестник Дона.* 2023;(3). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8286 (дата обращения: 21.07.2023).

5. Булдыжов А.А., Алимов Л.А. Самоуплотняющиеся бетоны с наномодификаторами на основе техногенных отходов. *Промышленное и гражданское строительство.* 2014;8:86–88.

6. Ларсен О.А., Наруть В.В., Воронин В.В. Технология переработки бетонного лома с целью получения самоуплотняющегося бетона. *Строительство и реконструкция.* 2020;(2):61–66. https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-61-66

7. Ivanov I.M., Kramar L.Ya., Orlov A.A. Influence of Superplasticizer-Microsilica Complex on Cement Hydration, Structure and Properties of Cement Stone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2017;262:012028. https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012028

8. Kong F.R., Pan L.S., Wang C.M., Zhang D.L., Xu N. Effect of Polycarboxylate Superplasticizers with Different Molecular Structure on the Hydration Behavior of Cement Paste. *Construction and Building Materials.* 2016;105:545–553. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.178

9. Smirnova O.M. Compatibility of Portland Cement and Polycarboxylate-Based Superplasticizers in High-Strength Concrete for Precast Constructions. *Magazine of Civil Engineering*. 2016;6:12–22. https://doi.org/10.5862/MCE.66.2

10. Lange A., Plank J. Formation of Nano-Sized Ettringite Crystals Identified as Root Cause for Cement Incompatibility of PCE Superplasticizers. In: *Nanotechnology in Construction: Proceedings of NICOM5.* Sobolev K., Shah S. (eds.). Cham: Springer; 2015. P. 55–63. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17088-6_6

11. Nesvetaev G., Koryanova Yu., Korchagin I. To the Problem of the Methodology for Evaluating the Effectiveness of the Use of Superplasticizers in Concretes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020;709:044056. https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044056

12. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. Некоторые вопросы технологии бетонирования массивных фундаментных плит с применением самоуплотняющихся бетонных смесей. *Инженерный вестник Дона.* 2022;8. URL: http://wmv.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7870 (дата обращения: 08.08.2023).

13. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Чепурненко А.С., Сухин Д.П. О влиянии некоторых технологических факторов на качество бетона монолитных железобетонных конструкций. *Инженерный вестник Дона.* 2021;11. URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7256 (дата обращения: 12.07.2023).

14. Kastornykh L., Kaklyugin A., Kholodnyak M., Osipchuk I. Modified Concrete Mixes for Monolithic Construction. *Materials Science Forum.* 2021;1043:81–91. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.81

15. Касторных Л.И., Каклюгин А.В., Гикало М.А. Влияние суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов на эффективность термообработки монолитного бетона. *Строительные материалы.* 2023;4:35–41. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-35-41

16. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. *Модифицированные высококачественные бетоны*. Москва: Издательство АСВ; 2006. 368 с.

17. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. *Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ*. Киев: Выща школа; 1989. 324 с.

18. Роговенко Т.Н., Каклюгин А.В. *Izoline2015*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2015614784. 2015.

References

1. Vasilyeva EYu. Innovative Materials and Technologies in Housing Construction: Importance and Prospects. *Vestnik MGSU*. 2022;17(11):1586–1593. (In Russ.). https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.11.1586-1593

2. Osmanov SG, Manoilenko AY, Litovka VV. Selection of the Mechanization Variants of Concrete Works in Monolithic Frame Construction. *Engineering Journal of Don*. (In Russ.). 2019;(1). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5507 (accessed: 02.07.2023).

3. Lopatin N.A., Motornaja A.I., Neguliaeva E.Yu. The Most Effective Crushing Equipment and Testing of Recycled Concrete Aggregates. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015;10:34–45. https://doi.org/10.18720/CUBS.37.3

4. Graneva AV. The Application of Recycling in the Concrete and Reinforced Concrete Recycling Process. *Engineering Journal of Don*. 2023;(3). (In Russ.). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8286 (accessed: 21.07.2023).

5. Buldyzhov AA, Alimov LA. Self-Compacting Concretes with Nanomodifiers on the Basis of Industrial Waste. *Industrial and Civil Engineering*. 2014;8:86–88. (In Russ.).

6. Larsen OA, Naruts VV, Voronin VV. Concrete Recycling Technology for Self-compacting Concrete. *Building and Reconstruction*. 2020;(2):61–66. (In Russ.). https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-61-66

7. Ivanov IM, Kramar LYa, Orlov AA. Influence of Superplasticizer-Microsilica Complex on Cement Hydration, Structure and Properties of Cement Stone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;262:012028. https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012028

8. Kong FR, Pan LS, Wang CM, Zhang DL, Xu N. Effect of Polycarboxylate Superplasticizers with Different Molecular Structure on the Hydration Behavior of Cement Paste. *Construction and Building Materials*. 2016;105:545–553. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.178

9. Smirnova OM. Compatibility of Portland Cement and Polycarboxylate-Based Superplasticizers in High-Strength Concrete for Precast Constructions. *Magazine of Civil Engineering*. 2016;6:12–22. https://doi.org/10.5862/MCE.66.2

10. Lange A, Plank J. Formation of Nano-Sized Ettringite Crystals Identified as Root Cause for Cement Incompatibility of PCE Superplasticizers. In: *Nanotechnology in Construction: Proceedings of NICOM5*. Sobolev K, Shah S (eds.). Cham: Springer; 2015. P. 55–63. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17088-6_6

11. Nesvetaev G, Koryanova Yu, Korchagin I. To the Problem of the Methodology for Evaluating the Effectiveness of the Use of Superplasticizers in Concretes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;709:044056. https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044056

12. Nesvetaev GV, Koryanova YI, Sukhin DP. Some Questions of the Technology of Concreting Massive Foundation Slabs Using Self-Compacting Concrete Mixtures. *Engineering Journal of Don*. 2022;(8):327-345. (In Russ.). URL: http://wmv.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7870 (accessed: 08.08.2023).

13. Nesvetaev GV, Koryanova YI, Chepurnenko AS, Sukhin DP. On the Influence of Some Technological Factors on the Quality of Concrete of Monolithic Reinforced Concrete Structures. *Engineering Journal of Don*. 2021;(11). (In Russ.). URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7256 (accessed: 12.07.2023).

14. Kastornykh L, Kaklyugin A, Kholodnyak M, Osipchuk I. Modified Concrete Mixes for Monolithic Construction. *Materials Science Forum*. 2021;1043:81–91. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.81

15. Kastornykh LI, Kaklyugin AV, Gikalo MA. The Effect of Polycarboxylate-Based Superplasticizers on the Efficiency of Heat Treatment of Monolithic *Concrete. Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. 2023;4:35-41. (In Russ.). https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-35-41

16. Bazhenov YuM, Dem'yanova VS, Kalashnikov VI. *Modified High-Quality Concretes*. Moscow: Publishing House ASV; 2006. 368 p. (In Russ.).

17. Voznesenskij VA, Lyashenko TV, Ogarkov BL. *Numerical Methods for Solving Construction and Technological Problems with Computers*. Kiev: Vyshcha shkola; 1989. 324 p. (In Russ.).

18. Rogovenko TN, Kaklyugin AV. *Izoline2015*. Certificate of State Registration of the Computer Program, № 2015614784. 2015. (In Russ.).

Поступила в редакцию 14.09.2023
Поступила после рецензирования 01.10.2023
Принята к публикации 16.10.2023

Об авторах:

Касторных Любовь Ивановна, доцент кафедры «Технологический инжиниринг и экспертиза в стройиндустрии» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, likas9@mail.ru

Гикало Максим Алексеевич, магистрант кафедры «Технологический инжиниринг и экспертиза в стройиндустрии» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, gikalo_max@mail.ru

Каклюгин Александр Викторович, доцент кафедры «Строительные материалы» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, kaklugin@gmail.com

Серебряная Ирина Анатольевна, доцент кафедры «Технологический инжиниринг и экспертиза в стройиндустрии» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, silveririna@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Касторных Л.И. — разработка плана и проведение экспериментальных работ.

Гикало М.А. — проведение экспериментов, подготовка иллюстраций.

Каклюгин А.В. — программная реализация и статистическая обработка экспериментальных данных.

Серебряная И.А. — статистическая обработка экспериментальных данных.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 14.09.2023
Revised 03.10.2023
Accepted 16.10.2023

About the Authors:

Lyubov I. Kastornykh, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Process Engineering and Assessment in Construction Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, likas9@mail.ru

Maksim A. Gikalo, Master's student of the Process Engineering and Assessment in Construction Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, gikalo_max@mail.ru

Alexander V. Kaklyugin, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Construction Materials Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, kaklugin@gmail.com

Irina A. Serebryanaya, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Process Engineering and Assessment in Construction Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, silveririna@mail.ru

Claimed contributorship:

Kastornykh LI — development of a plan and carrying out works in the frame of the experiment.

Gikalo MA — conducting the experiments, preparing the illustrations.

Kaklyugin AV — software implementation and statistical processing the experiment data.

Serebryanaya IA — statistical processing of experiment data.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА





Научная статья

УДК 693

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-94-103

Контроль качества скрытых строительных работ по фотоснимкам, прилагаемым к актам освидетельствования



О.А. Мамонова , **Е.А. Жолобова**  ✉

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ Elena@rniiakh.ru

Аннотация

Введение. В строительном производстве проблему повышения достоверности информации, содержащейся в актах освидетельствования скрытых работ, все чаще решают с помощью их фотофиксации. Основываясь на результатах ранее выполненных исследований, авторы доказывают, что, используя диагностическую информативность фотоснимков, можно не только подтверждать факт выполнения скрытых работ в нужном объеме, но и получать дополнительную информацию об их качестве. Для эффективного извлечения этой информации необходима разработка метода контроля качества скрытых строительных работ по фотоснимкам, прилагаемым к актам освидетельствования, с учетом современных научных достижений в области фотограмметрии и цветотекстурного анализа фотографических изображений.

Материал и методы. В основу разрабатываемого метода контроля качества скрытых строительных работ положено применение контурного, пиксельного, макро- и микротекстурного анализа фотографических изображений. При разработке метода были использованы результаты многочисленных визуальных обследований строительных конструкций (в том числе со вскрытием внутренних их элементов) и сопоставление этих результатов с информацией, содержащейся в актах освидетельствования скрытых работ.

Результаты исследования. В статье представлены результаты выполненного в Донском государственном техническом университете исследования по разработке метода контроля качества скрытых строительных работ по фотоснимкам, прилагаемым к актам освидетельствования. Представлены разработанные авторами алгоритмы процессов анализа фотоснимков строительных конструкций для контроля их качества. Даны предложения по систематизации и хранению типовых текстур поверхностей строительных конструкций.

Обсуждение и заключение. Приоритетным условием успешного применения нового метода контроля качества скрытых строительных работ является его методическое обеспечение, устанавливающее единый порядок их фотофиксации, дополнительные требования к составу и параметрам фотоснимков, правила оформления, хранения и использования их в качестве приложений к оформляемым актам освидетельствования скрытых строительных работ, а также регламент выполнения комплексного анализа фотоснимков с применением соответствующего программного обеспечения.

Ключевые слова: строительство, скрытые работы, акты освидетельствования, контроль качества, фотографические изображения, цветотекстурный анализ

Для цитирования. Мамонова О.А., Жолобова Е.А. Контроль качества скрытых строительных работ по фотоснимкам, прилагаемым к актам освидетельствования. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):94–103. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-94-103

Original article

Quality Control of the Hidden Construction Works by Means of Photographs Attached to the Certificates of Inspection

Olga A. Mamonova, **Elena A. Zholobova** ✉

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ Elena@rniiakh.ru

Abstract

Introduction. Within construction operations the problem of making more trustworthy the information included in the certificates of inspection of hidden works is most often solved by means of photofixation thereof. Based on the previous research results, the authors prove that diagnostic informativeness of the photographs can be used not only to confirm the fact of executing the hidden works in the required scope, but also to get additional information about their quality. To be able to retrieve this information efficiently it is necessary to develop the methodology for controlling quality of the hidden construction works by means of the photographs attached to the certificates of inspection, using advanced scientific achievements in the field of photogrammetry and colour texture analysis of photographic images.

Materials and Methods. The developed quality control methodology of the hidden construction works is based on the use of contour, pixel, macro- and micro-texture analysis of the photographic images. When developing the present methodology, the results of numerous visual examinations of the building structures (including their internal elements' uncovering) have been used and compared against the information in the certificates of inspection of hidden works.

Results. The article presents the results of the study conducted at Don State Technical University on development of the quality control methodology of the hidden construction works by means of the photographs attached to the certificates of inspection. The algorithms developed by the authors for analysing the photographs of the building structures to control their quality have been presented. The proposals on systematisation and storage of the typical textures of the building structure surfaces have been provided.

Discussion and Conclusion. The foremost condition for successful implementation of the new methodology of the hidden construction works quality control is its methodological support, which determines the unified procedure for photofixation, additional requirements to the combination and parameters of photographs, rules of their registration, storage and use as annexes to the certificates of inspection of hidden works, as well as provides the guidelines for the comprehensive analysis of photographs using the appropriate software.

Keywords: construction, hidden works, certificates of inspection, quality control, photographic images, colour texture analysis.

For citation. Mamonova OA, Zholobova EA. Quality Control of the Hidden Construction Works by Means of Photographs Attached to the Certificates of Inspection. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):94–103. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-94-103

Введение. При контрольном вскрытии внутренних слоев или других элементов строительных конструкций, например, при выяснении причин их неработоспособного состояния, нередко выявляются случаи недостоверности содержащейся в актах освидетельствования скрытых работ информации по утвержденной проектной документации. Для обеспечения надежной защиты от проявления случаев недобросовестности и злоупотребления при оформлении таких актов целесообразно дополнять их фотоснимками, подтверждающими факт выполнения этих работ.

В соответствии с ГОСТ Р 70108-2022[1] лицо, осуществляющее строительство (генподрядчик или субподрядчик), может производить фотофиксацию подлежащих освидетельствованию скрытых работ с внесением запечатленной информации в комплект выходных материалов. Необходимость осуществления такой фотофиксации с включением полученных фотоснимков в приложения к актам освидетельствования скрытых работ устанавливается договором строительного подряда.

Результаты ранее выполненных авторами исследований [1] показали, что фотоснимки строительных конструкций обладают диагностической информативностью, которая позволяет дистанционно контролировать их

[1] ГОСТ Р 70108-2022. *Документация исполнительная. Формирование и ведение в электронном виде*. М.: ФГБУ «РСТ», 2022. 40 с.

качество. С развитием методов цветотекстурного анализа фотографических изображений [2–10] объем информации, которую можно получить о состоянии представленных на них конструкций, значительно увеличивается. Поэтому в настоящее время стало возможным использование фотоснимков не только для документального подтверждения фактически выполненных работ, но и в качестве источников генезисной и диагностической информации о состоянии внутренних (скрытых) элементов строительной конструкции, доступ к которым затруднен.

Выявленные авторами закономерности влияния многочисленных факторов на диагностическую информативность фотографических изображений [11] позволяют определять по ним не только вид используемых в строительной конструкции материалов, но и судить о некоторых их свойствах: влажности, водопоглощении, водоудерживающей способности, степени уплотнения, прочности и деструкции, тем самым многократно повышая ценность этих фотоснимков.

Для возможности практического применения в строительном производстве всех перечисленных научных результатов необходима разработка метода контроля качества скрытых строительных работ по фотоснимкам, прилагаемым к актам освидетельствования.

Материалы и методы. В основу разрабатываемого метода контроля качества скрытых строительных работ положено применение фотограмметрии и различных методов цветотекстурного анализа фотографических изображений [12–20], и в частности контурного, пиксельного, макро- и микротекстурного анализа.

При разработке метода были использованы результаты многочисленных визуальных обследований строительных конструкций (в том числе со вскрытием внутренних их элементов) и сопоставление этих результатов с информацией, содержащейся в актах освидетельствования скрытых работ. Для проверки достоверности диагностической информации о качестве скрытых работ, получаемой из фотоснимков, там, где это было возможно, применялась дефектоскопия строительных конструкций.

При этом авторами метода учитывался существующий порядок фотофиксации скрытых работ, установленный в ГОСТ Р 70108-2022, согласно которому:

– фотофиксацию осуществляют фотоаппаратом или другим устройством, позволяющим получать цветные фотоснимки, отражающие характерные параметры строительной конструкции с привязкой к координатам объекта (например, с указанием наименования изображенной строительной конструкции, координатной оси, этажа или высотной отметки и т. п.) и факт выполнения контролируемых работ;

– при фотосъемке обеспечивают фокусировку и неподвижность камеры, а также устраняют все возможные препятствия для съемки;

– запрещается всякое редактирование получаемого фотографического изображения, например, путем его обрезки, изменения яркости, контрастности и цветности;

– фотодокументы должны иметь разрешение не менее 2592x1944, допускаемые форматы изображения — JPEG, tiff или png. Размер одного фотодокумента должен быть не менее 3 Мбайт и не превышать 30 Мбайт.

Результаты исследования. Исследование, связанное с разработкой метода контроля качества скрытых строительных работ по фотоснимкам, прилагаемым к актам освидетельствования, выполнено в Донском государственном техническом университете на кафедрах «Технология строительного производства» и «Математика и информатика».

На первом этапе исследования авторами произведен выбор диагностически ценных, выявляемых по фотоснимкам, признаков качества внутренних (скрытых) элементов строительных конструкций. При этом обоснованы состав и очередность выполнения процедур, обеспечивающих выявление этих признаков на стадиях контурного, макро- и микротекстурного, а также пиксельного анализа фотографических изображений. Указанные признаки и процедуры представлены в таблице 1.

На втором этапе исследования разработаны алгоритмы процессов анализа фотографических изображений строительных конструкций для контроля их качества.

На стадии контурного анализа фотографических изображений целесообразно использовать известные методы фотограмметрии. В разрабатываемом методе анализа новыми являются стадии макро- и микротекстурного, а также пиксельного анализа изображений, которые являются элементами цветотекстурного анализа.

Предложенный авторами алгоритм процесса контроля качества скрытых строительных работ на основе цветотекстурного анализа фотографических изображений учитывает существование сформулированных в соответствии с действующими сводами правил диагностически ценных признаков качества внутренних (скрытых) элементов конструкций, а также возможность сочетания методов фотограмметрии и методов цветотекстурного анализа. Алгоритм такого процесса для ограждающих конструкций, в котором блок цветотекстурного анализа фотографических изображений является главным, оформлен в виде блок-схемы в соответствии с ГОСТ 19.701-90[2] и представлен на рис. 1.

[2] ГОСТ 19.701-90 *Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения.* М. Стандартинформ, 2010. 26 с.

Таблица 1

Основные диагностически ценные признаки качества строительных конструкций

Стадии анализа фотоснимков	Краткое описание диагностически ценных признаков качества строительных конструкций	Процедуры выявления диагностически ценных признаков
Контурный	Соответствие проектной документации геометрических размеров строительных конструкций и их элементов	Сегментация, фотограмметрия
	Величина отклонения поверхностей стен и колонн от вертикали, а рядов кладки перегородок и стен — от горизонтали	То же
	Недопустимое смещение элементов конструкций от проектного положения	—
	Несоответствие уклона кровли проекту	—
	Прогиб несущих элементов перекрытия и покрытия	—
	Величина нахлестки рулонных и листовых материалов	—
	Величина неровностей поверхностей ограждающих конструкций	Теневой метод
Макротекстурный	Правильность допущенной перевязки швов кладки	Сегментация и распознавание макротекстуры изображения
	Порядок чередования в кирпичной кладке тычковых и ложковых рядов	То же
	Соответствие проектной документации вида использованных штучных материалов	—
	Направление раскатки в кровле и пароизоляции полотнищ рулонного материала	Фурье-анализ
Микротекстурный	Соответствие формы и размеров поперечного сечения растворных швов, обрешетки и других линейных элементов установленным требованиям	Построение и анализ профилей фотографического изображения
	Качество уплотнения теплоизоляции из насыпных материалов	То же
	Наличие локальных повреждений и дефектов на поверхности строительной конструкции или ее элемента (трещин, разрывов, наплывов, складок, загрязнений, ржавчины и др.).	Сегментация, распознавание микротекстуры изображения
	Ширина раскрытия трещин	—
	Признак отсутствия армирования горизонтальных швов в кирпичной кладке стен и столбов	То же
	Полное или частичное отсутствие отдельных слоев или других элементов строительной конструкции	—
	Зерновой состав материала насыпного слоя	Сегментация изображения
Пиксельный	Наличие или отсутствие заданного в проектной документации блеска окрасочного покрытия	Построение и анализ гистограммы изображения
	Соответствие проектной документации вида использованных в конструкции нештучных материалов	То же
	Соответствие степени деструкции, влажности, зрелости цементосодержащих растворов и бетонов предъявляемым к ним требованиям	—
	Соответствие проектной документации цвета отделочного покрытия	—

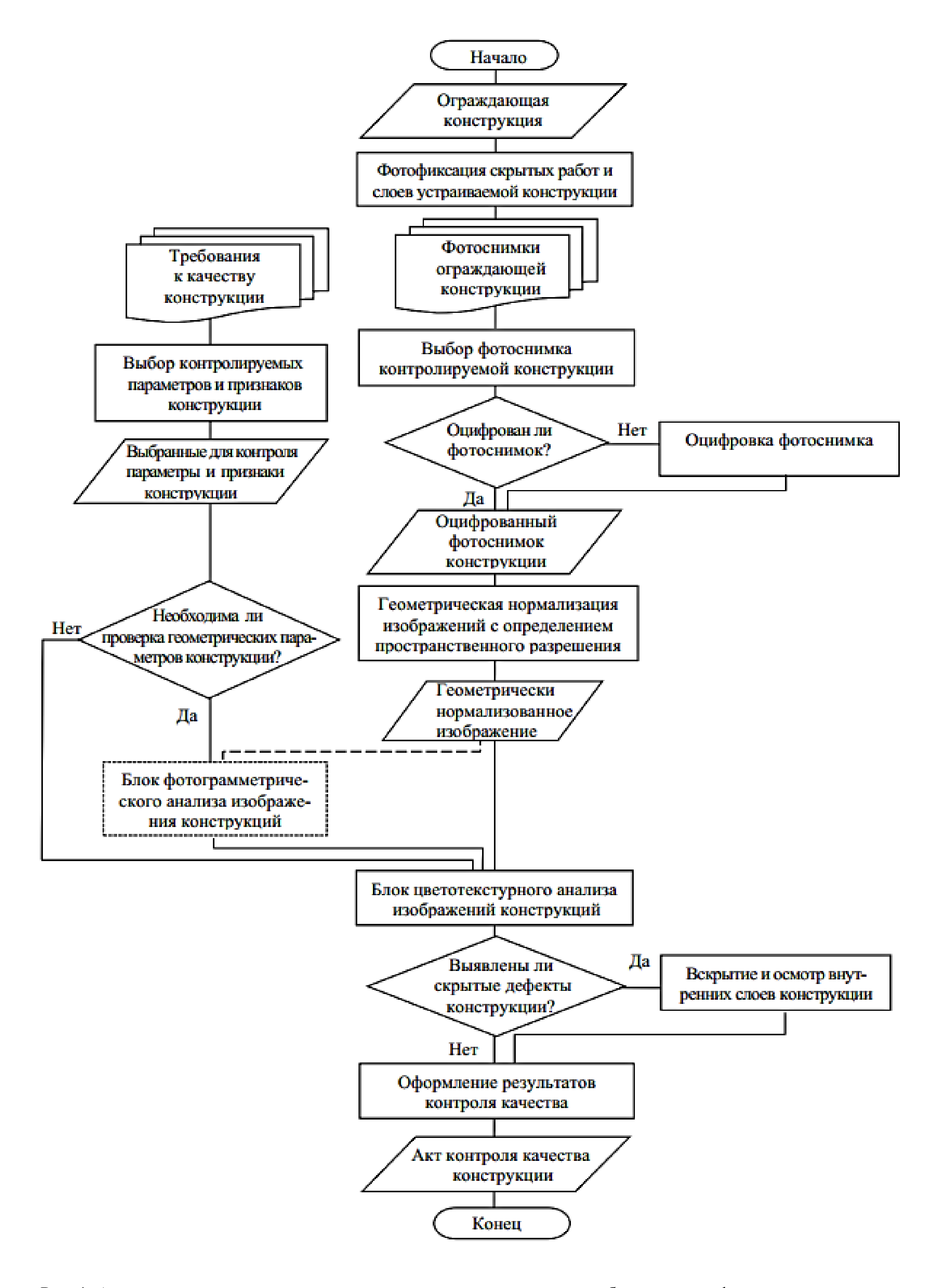


Рис. 1. Алгоритм процесса контроля качества скрытых строительных работ на основе фотограмметрического и цветотекстурного анализа фотографических изображений

Алгоритм цветотекстурного анализа фотографических изображений ограждающих строительных конструкций предусматривает наличие заранее заполненных таблиц с фотографическими изображениями строительных материалов, иллюстрирующими закономерности изменения структуры цвета их поверхностей и картотеки текстур этих изображений. Алгоритмом предусмотрена возможность выбора ручного или автоматизированного вы-

полнения многих процедур цветотекстурного анализа, что делает его менее зависимым от программной и технической оснащенности инженерно-технического работника, осуществляющего контроль качества строительства, а также использования не только стандартных процедур цветотекстурного анализа фотографических изображений, но и процедур, специально разработанных авторами. В качестве примера на рис. 2 в виде блок-схемы представлен алгоритм цветотекстурного анализа фотографических изображений ограждающих конструкций.

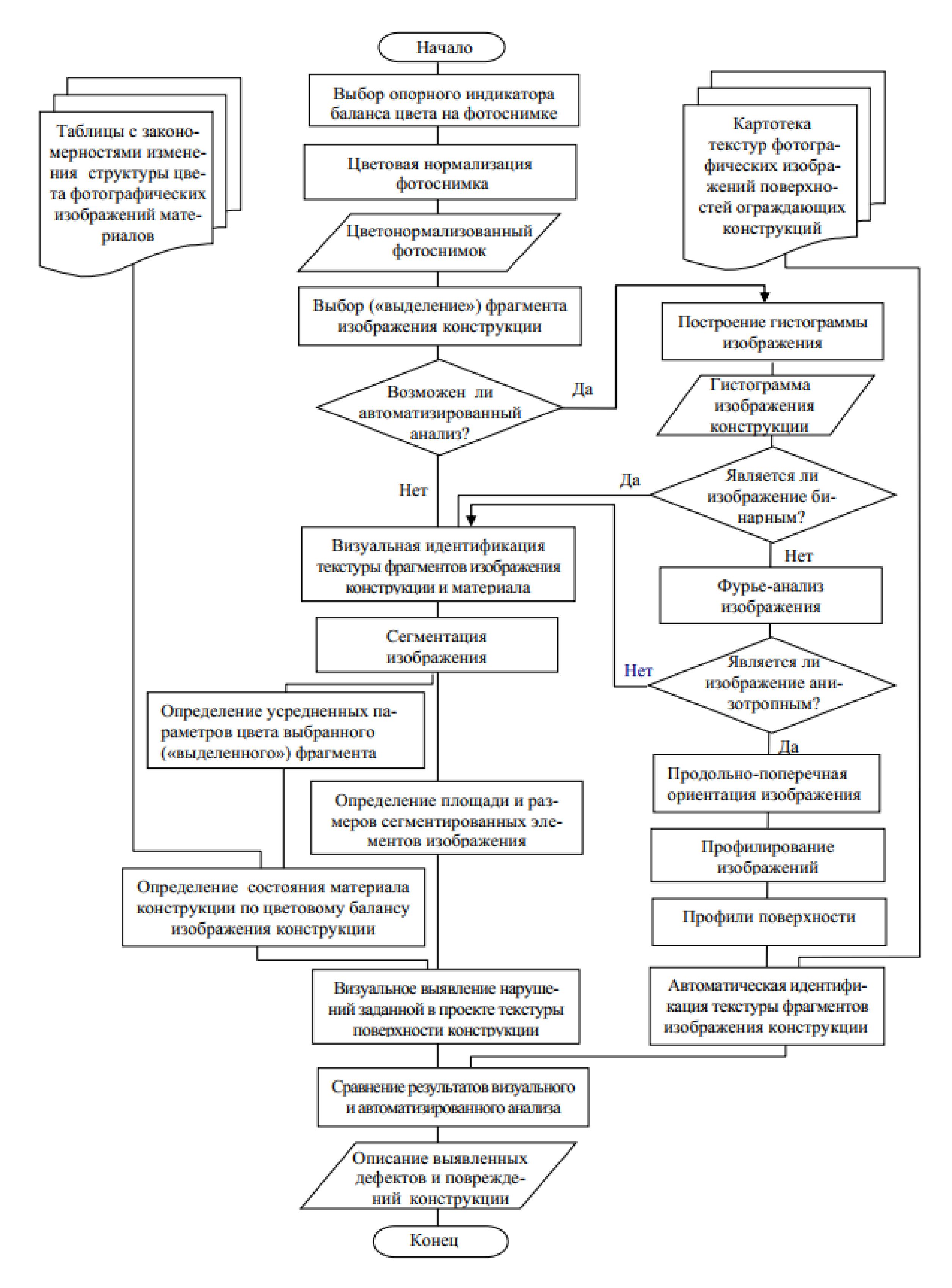


Рис. 2. Алгоритм цветотекстурного анализа фотографических изображений ограждающих строительных конструкций

На следующем этапе исследования авторами установлена невозможность автоматического распознавания текстур фотографических изображений строительных конструкций без создания обширной базы данных с изображениями текстур всевозможных строительных материалов, используемых при устройстве слоев указанных конструкций.

Для систематизации и хранения типовых текстур фотографических изображений предлагается создать банк таких текстур, структуру которого, например, для ограждающих конструкций зданий и сооружений, можно сформировать в соответствии с предложенной авторами классификацией функциональных слоев этих конструкций, представленной в таблице 2, и классификацией текстур — в таблице 3.

Таблица 2

Структура банка микротекстур поверхностей строительных материалов, используемых в ограждающих конструкциях зданий и сооружений

Вид материала	Наименование материала (марка, сорт или класс)	Влажностное состояние			Зрелость[1], %			Шероховатость поверхности		Степень деструкции		Номер строки
		Сухое	Воздушно-сухое	Водонасыщенное	0	50	100	Минимальная	Максимальная	Минимальная	Максимальная	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
												1
												2
												и т. д.

Примечание: [1]зрелость материала учитывается только для цементосодержащих бетонов и растворов; ячейки таблицы, выделенные заливкой, служат для ввода и хранения типовых микротекстур.

Таблица 3

Структура банка макротекстур поверхностей слоев ограждающих строительных конструкций зданий и сооружений

Вид (тип) ограждающей конструкции	Наименование элемента (слоя) ограждающей конструкции	Вид основного материала	Метод укладки	Вид освещения поверхности			Номер строки
				Фронтальное	Боковое	Рассеянное	
1	2	3	4	5	6	7	8
							1
							2
							и т. д.

Примечание: ячейки таблицы, выделенные заливкой, служат для ввода и хранения типовых макротекстур.

При оформлении результатов анализа фотоснимков скрытых работ в тексте заключения целесообразно указать регистрационные номера (коды) фотоснимков и выявленные строительные дефекты. Изображения всех выявленных дефектов конструкции на фотоснимках можно выделить автоматически (с помощью сегментации изображения) или вручную. При признании несоответствия качества материала, использованного при устройстве конструкции, предъявляемым требованиям в заключении рекомендуется привести фрагменты изображения и типовой микротекстуры предусмотренного проектом материала.

Обсуждение и заключение. Учитывая заинтересованность заказчиков строительства в повышении достоверности информации, содержащейся в актах освидетельствования скрытых строительных работ, целесообразно до принятия ведомственных и государственных документов стандартизации, регламентирующих порядок применения предлагаемого авторами нового метода контроля качества, начать его внедрение в практику на добровольной основе, когда по договору с заказчиком подрядчик принимает на себя функции по фотофиксации выполняемых скрытых строительных работ с оформлением соответствующих выходных материалов.

Приоритетным условием успешного применения нового метода контроля качества скрытых строительных работ является его методическое обеспечение, устанавливающее единый порядок фотофиксации, дополнительные требования к составу и параметрам фотоснимков, правила оформления, хранения и использования их в качестве приложений к оформляемым актам освидетельствования скрытых строительных работ, а также регламент выполнения комплексного анализа фотоснимков с применением соответствующего программного обеспечения.

Для повсеместного применения предлагаемого метода контроля качества потребуется утверждение на государственном или ведомственном уровне общих положений, обязывающих участников строительства осуществлять фотофиксацию скрытых строительных работ при их освидетельствовании и прилагать фотодокументы к составляемым при этом актам.

По мере развития информационных технологий и фототехнических средств предлагаемый метод будет развиваться в направлении:

– повышения информативности фотографических изображений;

– автоматизации процесса цветотекстурного анализа фотографических изображений;

– расширения области применения метода контроля на другие труднодоступные и ответственные строительные конструкции.

Выполнение вышеперечисленных мероприятий позволит обеспечить эффективное применение предлагаемого метода контроля в строительстве, что будет способствовать повышению его качества.

Список литературы

1. Жолобова О.А. Производственный контроль качества каменных стен и других ограждающих конструкций зданий по фотографическим изображениям. *Вестник МГСУ.* 2013;11:234−240. http://doi.org/10.22227/1997-0935.2013.11.234-240

2. Гонсалес Р. *Цифровая обработка изображений.* Москва: Техносфера; 2012. 1104 с.

3. Ahmadvand A., Daliri M.R. Invariant Texture Classification Using a Spatial Filter Bank in Multi-resolution Analysis. *Image and Vision Computing.* 2016;45:1−10. https://doi.org/10.1016/j.imavis.2015.10.002

4. Armi L., Fekri-Ershad S. Texture image analysis and texture Classification Methods — A Review. *International Online Journal of Image Processing and Pattern Recognition.* 2019;2(1):1−29. https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.06554

5. Bianconi F., González E., Fernández A., Saetta S. Automatic classification of granite tiles through colour and txture features. *Expert systems with applications.* 2012;39(12):11212–11218. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.03.052

6. Charles Y.R., Ramraj R.A Novel local mesh color texture pattern for image retrieval system. *AEU-international journal of electronics and communications.* 2016;70(3):225−233. https://doi.org/10.1016/j.aeue.2015.11.009

7. Kabbai L., Abdellaoui M., Douik A. Image Classification by Combining Local and Global Features. *The Visual Computer*. 2019;35:679−693. https://doi.org/10.1007/s00371-018-1503-0

8. Fekri-Ershad S., Tajeripour F. Impulse-Noise Resistant Color-Texture Classification Approach Using Hybrid Color Local Binary Patterns and Kullback–Leibler Divergence. *Computer Journal.* 2017;60(11):1633−1648. https://doi.org/10.1093/comjnl/bxx033

9. Shu X., Song Z., Shi J., Huang S., Wu X-J. Multiple Channels Local Binary Pattern for Color Texture Representation and Classification. *Signal Processing: Image Communication*. 2021;98:116392. https://doi.org/10.1016/j.image.2021.116392

10. Tanyildizi E. A Hybrid Color Texture Image Classification Method Based on 2D and Semi 3D Texture Features and Extreme Learning Machine. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2012;88(11):358-362. URL: https://www.researchgate.net/publication/286943018_A_hybrid_color_texture_image_classification_method_based_on_2D_and_semi_3D_texture_features_and_extreme_learning_machine (дата обращения: 09.11.2023).

11. Жолобова О.А., Иванникова Н.А. Предложения по совершенствованию производственного контроля качества наружных стен и покрытий современных зданий. *Промышленное и гражданское строительство.* 2014;(6):24−27.

12. Adamopoulos E., Rinaudo F. Combining Multiband Imaging, Photogrammetric Techniques, and FOSS GIS for Affordable Degradation Mapping of Stone Monuments. *Buildings.* 2021;11(7):304. https://doi.org/10.3390/buildings11070304

13. Mesa P.H., Anastasiadis J., León F.P. Identification and Sorting of Regular Textures according to Their Similarity. In: *Proceedings of SPIE. Volume 9530. Automated Visual Inspection and Machine Vision.* Munich: SPIE Optical Metrology; 2015. 95300A. https://doi.org/10.1117/12.2184439

14. Galantucci R.A., Fatiguso F. Advanced Damage Detection Techniques in Historical Buildings Using Digital Photogrammetry and 3D Surface Analysis. *Journal of Cultural Heritage.* 2019;36:51–62. https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.09.014

15. Jalón M.L., Chiachío J., Gil-Martín L.M., Hernández-Montes E. Probabilistic Identification of Surface Recession Patterns in Heritage Buildings Based on Digital Photogrammetry. *Journal of Building Engineering.* 2021;34:101922. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101922

16. Liu Z., Brigham R., Long E.R., Wilson L., Frost A., Orr S.A. et al. Semantic Segmentation and Photogrammetry of Crowdsourced Images to Monitor Historic Facades. *Heritage Science.* 2022;10:27. https://doi.org/10.1186/s40494-022-00664-y

17. Napolitano R., Glisic B. Methodology for diagnosing crack patterns in masonry structures using photogrammetry and distinct element modeling. *Engineering structures.* 2019;181:519–528. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.036

18. Strząbała K., Ćwiąkała P., Gruszczyński W., Puniach E., Matwij W. Determining changes in building tilts based on uav photogrammetry. *Measurement.* 2022;202:111772. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111772

19. Vincke S., Bassier M., Vergauwen M. Image recording challenges for photogrammetric construction site monitoring. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences.* 2019;XLII-2/W9:747–753. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-747-2019

20. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В. *Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения.* Москва: Физматкнига; 2010. 672 с.

References

19. Zholobova OA. Manufacturing Quality Control of Stone Walls and Other Enclosing Structures of Buildings Based on Photographic Images. *Vestnik MGSU* 2013;(11):234–240. http://doi.org/10.22227/1997-0935.2013.11.234-240 (in Rus.)

20. Gonsales R. *Digital Image Processing.* Moscow: Tekhnosfera; 2012. 1104 p. (in Rus.)

21. Ahmadvand A, Daliri MR. Invariant Texture Classification Using a Spatial Filter Bank in Multi-resolution Analysis. *Image and Vision Computing.* 2016;45:1–10. https://doi.org/10.1016/j.imavis.2015.10.002

22. Armi L, Fekri-Ershad S. Texture Image Analysis and Texture Classification Methods - A Review. *International Online Journal of Image Processing and Pattern Recognition.* 2019;2(1):1–29. https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.06554

23. Bianconi F, González E, Fernández A, Saetta S. Automatic Classification of Granite Tiles Through Colour and Texture Features. *Expert Systems with Applications.* 2012;39(12):11212–11218. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.03.052

24. Charles YR, Ramraj R. A Novel Local Mesh Color Texture Pattern for Image Retrieval System. *AEU-International Journal of Electronics and Communications.* 2016;70(3):225–233. https://doi.org/10.1016/j.aeue.2015.11.009

25. Kabbai L, Abdellaoui M, Douik A. Image Classification by Combining Local and Global Features. *The Visual Computer.* 2019;35:679–693. https://doi.org/10.1007/s00371-018-1503-0

26. Fekri-Ershad S, Tajeripour F. Impulse-Noise Resistant Color-Texture Classification Approach Using Hybrid Color Local Binary Patterns and Kullback–Leibler Divergence. *Computer Journal.* 2017;60(11):1633–1648. https://doi.org/10.1093/comjnl/bxx033

27. Shu X., Song Z, Shi J, Huang S, Wu XJ. Multiple Channels Local Binary Pattern for Color Texture Representation and Classification. *Signal Processing: Image Communication.* 2021;98:116392. https://doi.org/10.1016/j.image.2021.116392

28. Tanyildizi E. A Hybrid Color Texture Image Classification Method Based on 2D and Semi 3D Texture Features and Extreme Learning Machine. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2012;88(11):358-362. URL: https://www.researchgate.net/publication/286943018_A_hybrid_color_texture_image_classification_method_based_on_2D_and_semi_3D_texture_features_and_extreme_learning_machine (accessed: 09.11.2023).

29. Zholobova OA, Ivannikova NA. Suggestions about Improving the Process Monitoring of External Wall and Coatings Quality of Modern Buildings. *Industrial and Civil Engineering.* 2014;(6):24–27. (in Rus.)

30. Adamopoulos E, Rinaudo F. Combining Multiband Imaging, Photogrammetric Techniques, and FOSS GIS for Affordable Degradation Mapping of Stone Monuments. *Buildings.* 2021;11(7):304. https://doi.org/10.3390/buildings11070304

31. Mesa PH, Anastasiadis J, León FP. Identification and Sorting of Regular Textures According to Their Similarity. In: *Proceedings of SPIE. Volume 9530. Automated Visual Inspection and Machine Vision.* Munich: SPIE Optical Metrology; 2015. 95300A. https://doi.org/10.1117/12.2184439

32. Galantucci RA, Fatiguso F. Advanced Damage Detection Techniques in Historical Buildings Using Digital Photogrammetry and 3D Surface Analysis. *Journal of Cultural Heritage.* 2019;36:51–62. https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.09.014

33. Jalón ML, Chiachío J, Gil-Martín LM, Hernández-Montes E. Probabilistic Identification of Surface Recession Patterns in Heritage Buildings Based on Digital Photogrammetry. *Journal of Building Engineering.* 2021;34:101922. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101922

34. Liu Z, Brigham R, Long ER, Wilson L, Frost A, Orr SA et al. Semantic Segmentation and Photogrammetry of Crowdsourced Images to Monitor Historic Facades. *Heritage Science.* 2022;10:27. https://doi.org/10.1186/s40494-022-00664-y

35. Napolitano R, Glisic B. Methodology for Diagnosing Crack Patterns in Masonry Structures Using Photogrammetry and Distinct Element Modeling. *Engineering Structures.* 2019;181:519–528. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.036

36. Strząbała K, Ćwiąkała P, Gruszczyński W, Puniach E, Matwij W. Determining Changes in Building Tilts Based on UAV Photogrammetry. *Measurement.* 2022;202:111772. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111772

37. Vincke S, Bassier M, Vergauwen M. Image Recording Challenges for Photogrammetric Construction Site Monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* 2019; XLII-2/W9:747−753. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-747-2019

38. Vizil'ter YV, Zheltov SY, Bondarenko AV. *Image processing and analysis in machine vision tasks. Moscow:* Fizmatkniga; 2010. 672 p. (in Rus.).

Поступила в редакцию 10.11.2023
Поступила после рецензирования 20.11.2023
Принята к публикации 23.10.2023

Об авторах:

Мамонова Ольга Александровна, доцент кафедры «Математика и информатика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, olga2.009@yandex.ru

Жолобова Елена Александровна, доцент кафедры «Технология строительного производства» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ScopusID, ORCID, Elena@rniiakh.ru

Заявленный вклад соавторов:

Мамонова О.А. — формирование рабочей гипотезы, цели и задачи исследования, подготовка текста, формирование выводов;

Жолобова Е.А. — обзор литературных источников, анализ и обобщение результатов исследования, доработка текста, оформление иллюстрации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 10.11.2023
Revised 20.11.2023
Accepted 23.11.2023

About the Authors:

Olga A. Mamonova, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Mathematics and Computer Science Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, olga2.009@yandex.ru

Elena A. Zholobova, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Construction Operations Technologies Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ORCID, Elena@rniiakh.ru

Claimed contributorship:

Mamonova OA— formulating the working hypothesis, aim and objective of the research, preparing the text, drawing up the conclusions;

Zholobova EA— literature sources review, analysis and synthesis of research results, refining the text, design of illustrations.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА





Научная статья

УДК 625.7/.8

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-104-114

Динамический отклик слоистых сред на ударное нагружение (на примере автомобильных дорог)

А.Н. Тиратурян  ✉, **А.В. Воробьев** 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ tiraturjan@list.ru

Аннотация

Введение. Основным способом оценки несущей способности дорожных конструкций (представляющих собой слоистую среду, состоящую из материалов разной жесткости) является испытание установками ударного нагружения. Анализ результатов этих испытаний сводится к рассмотрению только пиковых значений вертикальных перемещений без учета изменения этих параметров в частотном и временном диапазоне. Вместе с тем именно изучение амплитудно-частотных характеристик перемещений может позволить решить ряд актуальных проблем, связанных, например, с приведением фактических значений вертикальных перемещений к значениям при проектных режимах работы конструкции.

Целью исследования является анализ динамического отклика слоистых сред (дорожных конструкций) автомобильных дорог на ударное нагружение, направленный на приведение фактических параметров динамического отклика к проектным значениям, регламентируемым требованиями отечественных нормативных документов по проектированию дорог.

Материалы и методы. Современные установки ударного нагружения позволяют воспроизводить нагрузку со временем импульса 0,03 с, в то время как проектные значения модулей упругости рассчитаны для 0,1 с. Для преодоления этого противоречия авторами было реализовано точное решение динамического уравнения Ламе для многослойного полупространства, и построен ряд амплитудно-частотных характеристик перемещений, на основе обработки которых была выведена упрощенная функциональная зависимость.

Результаты исследования. Разработана методика построения амплитудно-частотных характеристик перемещений на поверхности дорожной одежды при ударном воздействии, которая находит свое практические применение. На основе точного решения динамического уравнения Ламе путем статистической обработки установлена упрощенная регрессионная зависимость для приведения вертикальных перемещений. Представлен пример расчета модулей упругости слоев дорожной конструкции с учетом их приведения в зависимости от времени приложения нагрузки.

Обсуждение и заключения. В рамках исследования впервые получена методика приведения фактических значений вертикальных перемещений к значениям при проектных режимах работы дорожной конструкции, целиком базирующаяся на расчетном анализе ее динамического НДС, в частности, амплитудно-частотной характеристике деформирования при нестационарном воздействии. Разработанный подход способен значительно повысить достоверность диагностики состояния автомобильных дорог, а также обеспечить единство измерений и результатов, получаемых при проектировании и диагностике дорог.

Ключевые слова: асфальтобетонные покрытия, механические свойства, долговечность, обратный расчет, численная модель, чаша прогиба

Для цитирования. Тиратурян А.Н., Воробьев А.В. Динамический отклик слоистых сред на ударное нагружение (на примере автомобильных дорог). *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):104–114. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-104-114

Original article

Dynamic Response of the Layered Mediums to the Impact Load (on the Example of Motorways)

Artem N. Tiraturyan ✉, **Andrey V. Vorobiev**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ tiraturjan@list.ru

Abstract

Introduction. The main way to assess the load-bearing capacity of the road structures (which represent the layered mediums consisting of the materials of different rigidity) is by testing them with the impact loading test facilities. The analysis of the results of such tests reveals that they focus only on studying the peak values of vertical movements without taking into account changes of these parameters in frequency or time. However, it is the study of amplitude-frequency specifications of movements that can enable solving a number of pressing problems, e.g., related to bringing the actual values of vertical movements to the values of design mode operation of the structure. The aim of the present research is to analyse the dynamic response of the motorway layered mediums (road structures) to the impact load in order to bring the actual parameters of the dynamic response to the design parameters, which comply with the requirements of the national regulatory documents on road design.

Materials and Methods. The modern impact loading test facilities make it possible to simulate the impact pulse duration of 0.03s, while the design values of the elasticity moduli equal to 0.1s. To overcome this discrepancy, the authors have implemented the precise solution of the dynamic Lame equation for a multilayered half-space and have drawn up a number of amplitude-frequency specifications of movements, which have been processed and have become a basis for deriving a simple functional dependency.

Results. The methodology of drawing up the amplitude-frequency specifications of the movements on the road pavement surface, subject to impact action, has been developed and implemented in practice. Based on the precise solution of the dynamic Lame equation, by using the statistical processing, a simple regression dependency for calculating the vertical movements has been determined. An example of the elastic moduli calculation of the road structure layers, taking into account their dependency on the load application time, has been presented.

Discussion and Conclusion. Within the framework of the research, for the first time, a methodology has been developed for bringing the actual values of vertical movements to the values of design mode operation of the road structure based entirely on the computational analysis of its dynamic stress-strain state (SSS), in particular, the amplitude-frequency specification of deformation under the non-stationary impact. The developed approach contributes significantly to increasing the credibility of the motorway condition diagnostics, as well as ensures the integrity of measurements and results obtained during the road design and diagnostics.

Keywords: asphalt concrete pavements, mechanical properties, durability, back-calculation, numerical model, deflection bowl

For citation. Tiraturyan AN, Vorobiev AV. Dynamic Response of the Layered Mediums to the Impact Load (on the Example of Motorways). *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):104–114. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-104-114

Введение. Одной из важнейших задач оценки прочности эксплуатируемых дорожных одежд на автомобильных дорогах является корректный учет температуры и времени нагружения. Общеизвестно, что основным критерием, определяющим прочность дорожной одежды, является ее расчет на допускаемый упругий прогиб. На этапе проектирования модули упругости слоев асфальтобетона назначаются для расчетной температуры 10 °С и времени воздействия колеса расчетного автомобиля — 0,1 с. В условиях эксплуатации, когда осуществляется измерение прочности, фактическая температура и время воздействия от различных установок динамического нагружения могут существенно отличаться от этих нормативных значений, что несомненно вносит вклад в точность и достоверность результатов измерений.

Однако необходимо констатировать, что в последние годы исследований, касающихся учета влияния температуры на свойства асфальтобетона, проведено крайне мало. Можно отметить исследования [1–3], позволившие

установить, что зависимость, связывающая общий модуль упругости дорожной одежды и температуру поверхности ее покрытия, имеет логарифмический характер и принимает следующий вид:

$$E = k \times lnT + B \quad (1)$$

где T — температура связных слоев, °C; k, B — эмпирические коэффициенты.

Коэффициенты k, B в свою очередь зависят от толщины связных слоев дорожной одежды. Помимо вышеуказанных исследований рекомендации по приведению модуля упругости асфальтобетонов к нормативным параметрам присутствуют в документе СТО АВТОДОР 10.1-2013 «Определение модулей упругости слоев эксплуатируемых дорожных конструкций с использованием установки ударного нагружения». В данном документе приводятся рекомендуемые коэффициенты перехода от модуля упругости асфальтобетона, замеренного при фактической температуре на поверхности покрытия и времени приложения нагрузки t = 0,03 с, к нормативной температуре 10 °C и времени воздействия колеса расчетного автомобиля — 0,1 с.

В зарубежной практике следует констатировать более широкий набор исследований, затрагивающих данную проблему. Так в исследованиях [4–6] указано, что модули упругости асфальтобетона, определенные в ходе натурных испытаний при фактической температуре, следует приводить к 20 °C либо к 25 °C. Механизм приведения в этих исследованиях также базируется на применении регрессионных зависимостей, связывающих модули упругости слоя с их температурой в диапазоне, как правило, от 0 до 40 °C.

В работах [7–10] отмечается влияние времени приложения нагрузки на значение модуля упругости слоев асфальтобетона. Отмечается, что с увеличением времени приложения нагрузки снижается модуль упругости слоев асфальтобетона. В основе самого алгоритма приведения в представленных работах лежит соотнесение динамического модуля упругости, зарегистрированного при частоте приложения нагрузки установки ударного нагружения FWD, с мастер-кривыми динамического модуля упругости асфальтобетонных образцов, отобранных из покрытия в точке ударного воздействия. В работе [11] приводятся сводные данные о принимаемых в различных источниках стандартных значениях частоты нагружения, воспроизводимой установками ударного нагружения FWD (таблица 1).

Таблица 1

Данные о частоте нагружения установкой ударного нагружения FWD, принимаемые различными авторами

Место исследований	Источник	Репрезентативная частота нагрузки FWD, Гц	Частотно-временное преобразование	Тип FWD
MnROAD	Clyne, et al., 2004	17,9	частота нагрузки определяется по временным данным тензометрического датчика	Dynatest
Virginia Tech Transportation Institute	Loulizi, et al., 2007	5,3	f=1/2πt	Dynatest
Kansas State University	Gedafa, et al., 2010	25	f=1/t	Dynatest
CEDEX	Mateos, et al., 2012	15	f=1/t	KUAB
Applied Research Associates, Inc. (ARA)	Ayyala, et al., 2017	30	f=1/t	Dynatest

Как видно из представленной таблицы в исследованиях, выполненных на полигоне MnRoad, а также в исследовательских организациях Kansas State University, CEDEX реализуется единый подход к определению частоты от приложения нагрузки установки ударного нагружения FWD, напрямую связывающий время импульса со временем. Различие в значениях частоты можно связать с разным расчетным временем импульса воздействия установки ударного нагружения. Иной подход применен в Virginia Tech Transportation Institute. В соответствии с [12] авторами было установлено наличие сдвига на величину 1/2π по оси частот, что и отражено в приведенной расчетной формуле.

Таким образом, очевидна малая изученность вопроса выполнения временной и температурной корректировки результатов измерений модулей упругости в условиях эксплуатации в практике РФ и серьезная разрозненность применяемых подходов в международной практике. Это позволяет сделать вывод об актуальности изучения механизмов приведения значений модулей упругости слоев асфальтобетона по частоте и температуре к нормативным значениям.

Материалы и методы. При проведении исследований была использована математическая модель динамического напряженно-деформированного состояния многослойного полупространства. Данная модель базируется на решениях, полученных в трудах [13–19]. Подробно постановка задачи и определяющие соотношения, реализуемые в математической модели, описаны в [20]. В рамках поставленной в данном исследовании задачи

анализируется динамическое напряженно-деформированное состояние многослойного полупространства под воздействием ударной нагрузки, распределенной по круговому отпечатку. Деформирование среды описывается системой уравнений Ламе. Решение этих уравнений осуществляется с использованием преобразования Ханкеля в виде:

$$\mathbf{U}^{(j,N)}(\mathbf{R},\omega) = \int_{\Gamma_+} J_k(uR) \sum_{n=1}^{2} \mathbf{P}^{(j,n)}(u,z) \cdot \overline{\mathbf{X}}^{(j,n)}(u) u du \qquad (2)$$

где J_k — функция Бесселя; $\boldsymbol{P}^{(j,n)}$ — ядро интегрального представления для многослойного полупространства; $\overline{\mathbf{X}}^{(j,n)}$ — преобразования Ханкеля для напряжения на границах слоев ($n = 1, 2$), определяемых из граничных условий.

Ядра интегрального преобразования для случая однородного полупространства имеют вид матриц-функций $\boldsymbol{P}^{(1)}(u, z)$:

$$\mathbf{P}^{(1)}(u,z) = \mathbf{D}(u,z) \cdot \mathbf{B}^{-1}(u,0), \qquad (3)$$

$$\mathbf{D}(u,z) = \begin{pmatrix} -u\exp(\sigma_{11}z) & -\sigma_{12}\exp(\sigma_{12}z) \\ \sigma_{11}\exp(\sigma_{11}z) & u\exp(\sigma_{12}z) \end{pmatrix}, \qquad (4)$$

$$\mathbf{B}^{-1}(u,0) = \begin{pmatrix} \zeta_2^2 & 2u\sigma_{21} \\ -2u\sigma_{11} & -\zeta_2^2 \end{pmatrix} \Delta_R^{-1}, \; \Delta_R = \zeta_2^4 - 4u^2\sigma_{11}\sigma_{12}, \; \varsigma_2^2 = u^2 + \sigma_{12}^2 \qquad (5)$$

Преобразование Фурье от импульса $\overline{\boldsymbol{X}}^{(1)}(u)$ для однородного полупространства в форме преобразования Ханкеля имеет вид:

$$\overline{\mathbf{X}}^{(1)}(u) = \sigma_0 P(\omega) \frac{J_1(uR_0)}{u} \qquad (6)$$

где σ_0 — давление на поверхность покрытия от воздействия установки ударного нагружения, Па; $P(\omega)$ — спектр нагружения.

Вывод представлений $\boldsymbol{P}^{(j,n)}$, $\overline{\boldsymbol{X}}^{(j,n)}$ для многослойного полупространства осуществляется с применением рекуррентных зависимостей, опирающихся на условие равенства перемещений на границах контакта слоев многослойного полупространства. Общий вид зависимостей представлен в [21]. Применение интегрального преобразования Ханкеля позволяет осуществить построение амплитудно-частотной характеристики перемещений в любой точке исследуемой среды. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) при этом имеет вид, представленный на рис. 1.

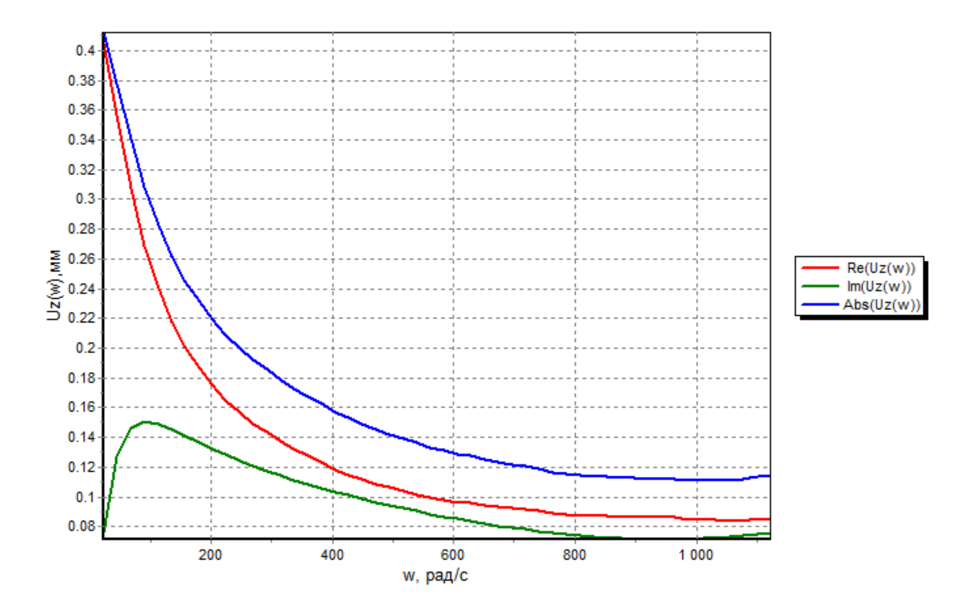


Рис. 1. АЧХ перемещений на поверхности многослойного полупространства:
Uz(w), мм — вертикальные перемещения; w, рад/с — круговая частота

Строительная механика

Данный график построен для нагрузки величиной 700 кПа и времени приложения 0,03 с. Частотная область, в которой отслеживаются колебания поверхности покрытия, находится в диапазоне от 0 до 1500 рад/с (от 0 до 238 Гц соответственно). Вертикальные перемещения изменяются в диапазоне от 0,43 мм при ω_0 = 0 рад/с (что соответствует статике) до 0,115 мм при ω_k = 1500 рад/с. Таким образом, в зависимости от частоты приложения нагрузки упругий прогиб изменяется в 3,74 раза. Для изучения влияния динамичности нагружения на величину вертикальных упругих деформаций был выполнен численный эксперимент для трех вариантов дорожных конструкций, отличающихся толщиной пакета асфальтобетонных слоев. Исследуемые конструктивы дорожных одежд и расчетные параметры представлены в таблице 2.

Таблица 2

Входные данные для моделирования

Конструкция дорожной одежды	Толщина слоев, см	Модуль упругости, МПа/ коэффициент Пуассона	Коэффициент демпфирования
Асфальтобетон	10–30	2000/0,35	0,08
Основание, не обработанное вяжущим	40	200/0,35	
Грунт земляного полотна	–	41/0,35	

Модуль упругости слоя асфальтобетона принимался в виде средневзвешенного значения, коэффициент демпфирования слоя асфальтобетона задавался в соответствии с [22]. Результаты моделирования представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты моделирования амплитудно-частотной характеристики деформирования на поверхности покрытия

Конструкция 1					Конструкция 2					Конструкция 3				
F	*h*	*l*	*w*	$K_{пер}$	*F*	*h*	*l*	*w*	$K_{пер}$	*F*	*h*	*l*	*w*	$K_{пер}$
0	10	0	0,562	1,070476	0	20	0	0,59	1,432039	0	30	0	0,48	1,142857
		30	0,5	1,106195			30	0,462	1,121359			30	0,385	1,166667
		60	0,395	1,09116			60	0,362	1,113846			60	0,32	1,185185
		120	0,255	1,20283			120	0,248	1,169811			120	0,235	1,236842
		180	0,175	1,129032			180	0,175	1,166667			180	0,17	1,214286
10		0	0,525	1	10		0	0,53	1,286408	10		0	0,42	1
		30	0,452	1			30	0,412	1			30	0,33	1
		60	0,362	1			60	0,325	1			60	0,27	1
		120	0,212	1			120	0,212	1			120	0,19	1
		180	0,155	1			180	0,15	1			180	0,14	1
25		0	0,42	0,8	25		0	0,412	1	25		0	0,3	0,714286
		30	0,355	0,785398			30	0,305	0,740291			30	0,23	0,69697
		60	0,251	0,69337			60	0,23	0,707692			60	0,18	0,666667
		120	0,151	0,712264			120	0,12	0,566038			120	0,12	0,631579
		180	0,11	0,709677			180	0,095	0,633333			180	0,08	0,571429
50		0	0,3	0,571429	50		0	0,305	0,740291	50		0	0,215	0,511905
		30	0,25	0,553097			30	0,205	0,497573			30	0,145	0,439394
		60	0,175	0,483425			60	0,145	0,446154			60	0,11	0,407407
		120	0,095	0,448113			120	0,08	0,377358			120	0,065	0,342105
		180	0,062	0,4			180	0,05	0,333333			180	0,04	0,285714
100		0	0,21	0,4	100		0	0,212	0,514563	100		0	0,14	0,333333
		30	0,162	0,358407			30	0,0125	0,03034			30	0,085	0,257576
		60	0,1	0,276243			60	0,075	0,230769			60	0,06	0,222222
		120	0,05	0,235849			120	0,04	0,188679			120	0,03	0,157895
		180	0,037	0,23871			180	0,025	0,166667			180	0,02	0,142857
180		0	0,162	0,308571	180		0	0,152	0,368932	180		0	0,11	0,261905
		30	0,11	0,243363			30	0,075	0,182039			30	0,05	0,151515
		60	0,06	0,165746			60	0,048	0,147692			60	0,03	0,111111
		120	0,047	0,221698			120	0,25	1,179245			120	0,02	0,105263
		180	0	0			180	0	0			180	0	0

Моделирование осуществлялось для набора частот 0, 10, 25, 50, 100, 180 Гц и для точек наблюдения, находящихся на расстоянии от точки приложения нагрузки (l) — 0, 30, 60, 120, 180 см. В качестве стандартной частоты принималась частота 10 Гц, и для нее же считался коэффициент перехода $K_{пер}$. По итогам статистической обработки полученных результатов была построена корреляционная зависимость *K (f, l, h)* между коэффициентом перехода от фактической частоты нагружения к расчетной частоте 10 Гц, имеющая следующий вид:

$$K(f,l,h) = 1{,}305738 - 0{,}014451f + 0{,}000052f^2 - 0{,}066578\ln(h) - 0{,}000467l \quad (7)$$

где f — частота колебаний, Гц; h — толщина пакета слоев асфальтобетона; l — расстояние от точки ударного нагружения.

Статистическая обработка осуществлялась в программном комплексе Statistica. Коэффициент детерминации данной зависимости составил R2 = 0,97. Расчет и приведение вертикального перемещения к нормативной частоте и времени нагружения осуществляется по формуле:

$$U_{норм} = U_{f=25Гц} \times K(f,l,h) \quad (8)$$

Результаты исследования. В качестве примера реализации полученной зависимости был осуществлен расчет и приведение к расчетной частоте чаши прогибов и модулей упругости слоев дорожной одежды на эксплуатируемом участке автомобильной дороги М1 «Беларусь».

Конструкция дорожной одежды, для которой осуществлялся расчет, представлена в таблице 4.

Таблица 4

Конструкция дорожной одежды, принимаемая при моделировании

Слой	Толщина, см	Проектное значение модуля упругости, МПа
Асфальтобетон	19	2500
Основание	33	200
Дополнительный слой основания	50	120
Грунт земляного полотна		41

Фактическая чаша прогибов, зарегистрированная при фактическом времени контактного воздействия 0,04 с (что соответствует 25 Гц), и чаша прогибов, откорректированная в соответствии с зависимостью (7), представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты моделирования амплитудно-частотной характеристики деформирования на поверхности покрытия

Параметр	Датчик 1 (0)	Датчик 1 (200)	Датчик 1 (300)	Датчик 1 (600)	Датчик 1 (900)	Датчик 1 (1200)	Датчик 1 (1500)	Датчик 1 (1800)	Датчик 1 (2100)
Прогиб, мм, при частоте 25 Гц	0,380	0,326	0,291	0,245	0,210	0,145	0,102	0,072	0,053
Коэффициент перехода по частоте $K(f,l,h)$	0,781	0,772	0,767	0,753	0,739	0,725	0,711	0,697	0,683
Прогиб, мм, при частоте 10 Гц	0,487	0,423	0,379	0,325	0,284	0,200	0,143	0,103	0,078

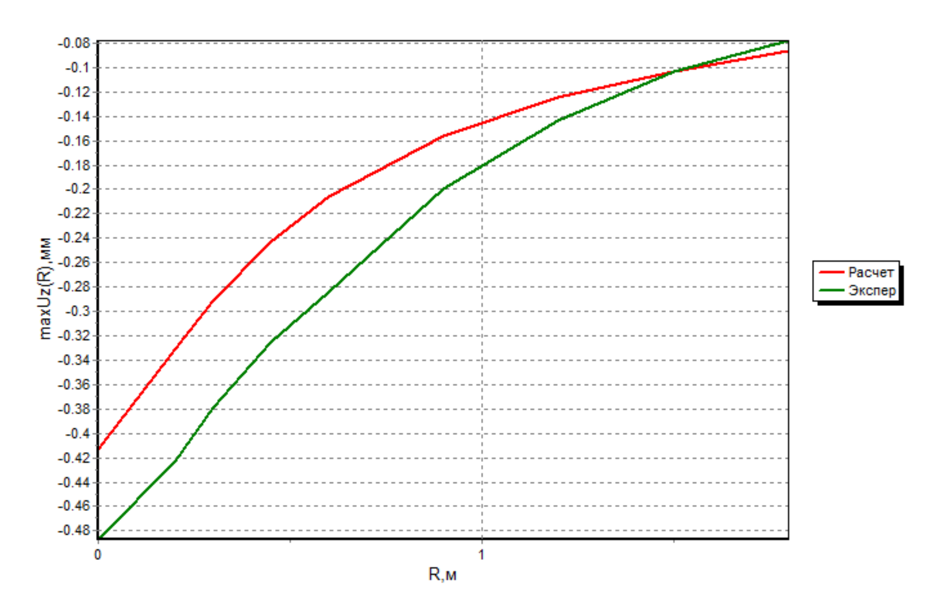


Рис. 2. Расчетная и экспериментальная чаша прогибов до корректировки

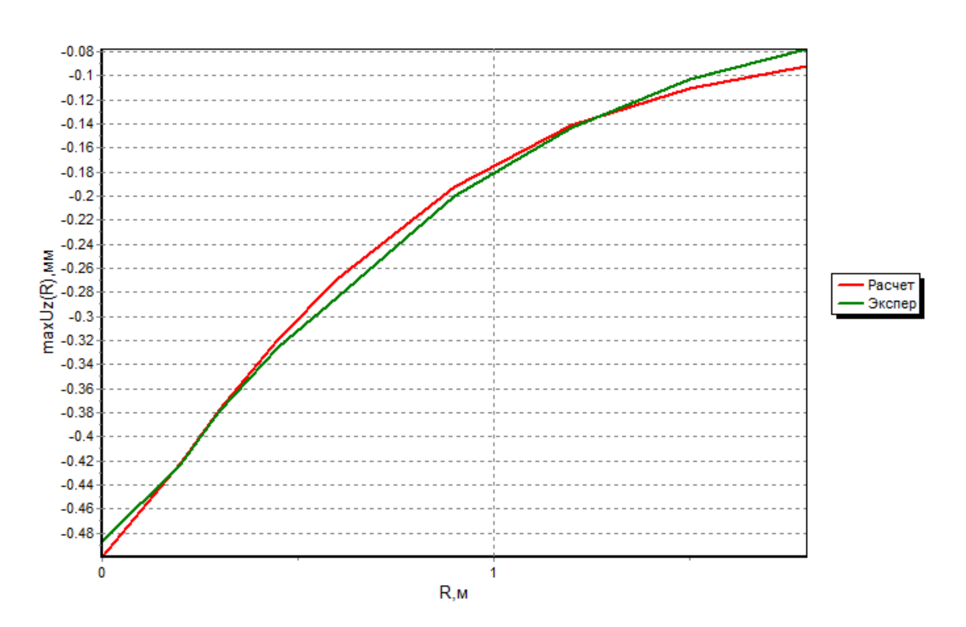


Рис. 3. Расчетная и экспериментальная чаша прогибов после корректировки

Таблица 6

Результаты определения модулей упругости конструктивных слоев дорожных одежд от фактического времени приложения нагрузки

Слой	Откорректированные модули (t = 0,03 с)	Откорректированные модули (t = 0,1 с)
Асфальтобетон	3200	3014
Основание	348	190
Дополнительный слой основания	62	55
Грунт земляного полотна	170	95

Как видно из таблицы 2, приведение модулей упругости слоев дорожной одежды по времени в соответствии с полученными зависимостями затрагивает все материалы конструктивных слоев, так как для многослойной системы изменение жесткости отдельных слоев влечет за собой изменения в форме АЧХ перемещений, что прослеживается в данных, представленных в таблице 1. Полученная зависимость позволяет осуществить расчет

общего модуля упругости на поверхности дорожной конструкции для времени приложения нагрузки t = 0,03 с, и t = 0,1 с. В этом случае общий модуль упругости рассчитывается как:

$$E_{\text{общ}} = \frac{pD(1-\mu^2)}{d_0}, \quad (9)$$

где $E_{\text{ОБЩ}}$ — общий модуль упругости на поверхности дорожной конструкции, МПа; p — давление, кПа; D — диаметр отпечатка, м; μ — коэффициент Пуассона; d_0 — упругий прогиб в центре приложения нагрузки, мм.

В этом случае значение общего модуля упругости при времени воздействия t = 0,03 с составит 575 МПа, а значение общего модуля упругости при времени воздействия t = 0,1 с — 449 МПа. Подобное приведение необходимо, когда речь идет о сопоставлении фактического общего модуля упругости с проектным значением, определенным по нормативным документам.

Обсуждение и заключения. Разработана методика построения амплитудно-частотных характеристик перемещений на поверхности дорожной конструкции при ударном воздействии.

Выполнено численное моделирование изменения амплитудно-частотной характеристики перемещений на поверхности дорожной конструкции для различных сочетаний толщины асфальтобетонных слоев, расстояния от точки ударного воздействия и частоты колебаний.

На основе точного решения динамического уравнения Ламе путем статической обработки установлена упрощенная регрессионная зависимость для приведения вертикальных перемещений, зарегистрированных при частоте 25 Гц (соответствующей частоте нагружения установки FWD), к нормативному времени нагружения 0.1 с (соответствующему нормативным документам). Коэффициент детерминации составил R2 = 0,97.

Представлен пример расчета модулей упругости слоев дорожной конструкции с учетом их приведения в зависимости от времени приложения нагрузки. Установлено, что при приведении модулей упругости слоев дорожной одежды от 25 Гц к 10 Гц происходит их снижение, проявляющееся для всех материалов слоев.

Список литературы

1. Кузнецов Ю.В., Мордвин С.С., Макаров Е.Н., Криушин П.А. Проблемы оценки прочности современных дорожных одежд. *Наука и техника в дорожной отрасли.* 2017;(2):37–40.

2. Мордвин С.С. Влияние температуры дорожной одежды на величину динамического прогиба. *Наука и техника в дорожной отрасли.* 2010;(2):31–34.

3. Кузнецов Ю.В., Мордвин С.С. Оценка прочности дорожной одежды динамическим нагружением. *Транспортное строительство.* 2010;(2):15–17.

4. Pratelli C., Betti G., Giuffrè T., Marradi A. Preliminary In-Situ Evaluation of an Innovative, Semi-Flexible Pavement Wearing Course Mixture Using Fast Falling Weight Deflectometer. *Materials.* 2018;11(4):611. https://doi.org/10.3390/ma11040611

5. Manosalvas-Paredes M., Navarro Comes A., Francesconi M., Khosravifar S., Ullidtz P. Fast Falling Weight Deflectometer (FastFWD) for Accelerated Pavement Testing (APT). In book: *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, 1st edition. London: CRC Press; 2017. 394 p. https://doi.org/10.1201/9781315100333

6. Chou C.P., Lin Y.C., Chen A.C. Temperature Adjustment for Light Weight Deflectometer Application of Evaluating Asphalt Pavement Structural Bearing Capacity. *Transportation Research Record.* 2017;2641(1):75–82. https://doi.org/10.3141/2641-10

7. Damnjanovic I., Zhang Z. Determination of Required Falling Weight Deflectometer Testing Frequency for Pavement Structural Evaluation at the Network Level. *Journal of Transportation Engineering.* 2006;132(1). https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:1(76)

8. Deng Y., Luo X., Zhang Y., Lytton R. Determination of Complex Modulus Gradients of Flexible Pavements Using Falling Weight Deflectometer and Artificial Intelligence. *Materials and Structures.* 2020;53(4):100. https://doi.org/10.1002/stc.2671

9. Khan Z.H., Tarefder R.A., Hasan M.A. Field Characterization of Pavement Materials Using Falling Weight Deflectometer and Sensor Data from an Instrumented Pavement Section. *Transportation Research Record*. 2020;2674(4):036119812091192. https://doi.org/10.1177/0361198120911926

10. Ingrassia L.P., Cardone F., Ferrotti G., Canestrari F. Monitoring the Evolution of the Structural Properties of Warm Recycled Pavements with Falling Weight Deflectometer and Laboratory Tests. *Road Materials and Pavement Design.* 2021;22(1):S69-S82. http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2021.1906302

11. Bech N. *Use of Falling Weight Deflectometer Testing in the Pavement ME AC/AC Overlay Design Procedure.* Master's Thesis. University of Pittsburgh; 2018. 375 p.

12. Sullivan B., Rickards I., Yousefdoost S. Interconversion of Laboratory Measured Modulus Results to Feld Modulus and Strain. In: *Proceedings of the AAPA International Flexible Pavements Conference*. Brisbane; 2013.

13. Ворович И.И., Бабешко В.А., Пряхина О.Д. *Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах.* Москва: Научный мир; 1999. 220 с.

14. Бабешко В.А., Глушков Е.В., Зинченко Ж.Ф. *Динамика неоднородных линейно-упругих сред.* Москва: Наука; 1989. 344 с.

15. Илиополов С.К., Селезнев М.Г., Углова Е.В. *Динамика дорожных конструкций.* Монография. Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского государственного строительного университета; 2002. 258 с.

16. Grundmann H., Lieb M., Trommer E. The Response of a Layered Half-space to Traffic Loads Moving Along its Surface. *Archive of Applied Mechanics.* 1999;69:55–67. https://doi.org/10.1007/s004190050204

17. Xu Q., Prozzi J.A. A Time-domain Finite Element Method for Dynamic Viscoelastic Solution of Layered-half-space Responses under Loading Pulses. *Computers and Structures.* 2015;160:20–39. http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.07.005

18. Schanz M. Poroelastodynamics: Linear Models, Analytical Solutions, and Numerical Methods. *Applied Mechanics Reviews.* 2009;62(3):030803. http://dx.doi.org/10.1115/1.3090831

19. Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Ляпин А.А. Комплексный подход к исследованию характеристик динамического деформирования на поверхности нежестких дорожных одежд с использованием методов неразрушающего контроля. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.* 2016;(2):111–130. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.08

20. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Nikolenko D.A., Nikolenko M.A. Model for Determining the Elastic Moduli of Road Pavement layers. *Magazine of Civil Engineering.* 2021;(3):10308. https://doi.org/10.34910/MCE.103.8

21. Lyapin A.A., Parinov I.A., Buravchuk N.I., Cherpakov A.V., Shilyaeva O.V., Guryanova O.V. *Improving Road Pavement Characteristics: Applications of Industrial Waste and Finite Element Modelling.* Cham: Springer Nature; 2020. 236 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59230-1

22. Uglova E., Tiraturyan A. Calculation of the Damping Factors of the Flexible Pavement Structure Courses According to the In-place Testing Data. *Procedia Engineering.* 2017;187:742–748. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.431

References

1. Kuznetsov YuV, Mordvin SS, Makarov YeN, Kriushin PA. Problems of Strength Assessment of Modern Road Pavements. *Science and Engineering for Roads.* 2017;(2):37–40. (In Russ.).

2. Mordvin SS. Influence of Road Pavement Temperature on the Dynamic Deflection Value. *Science and Engineering for Roads.* 2010;(2):31–34. (In Russ.).

3. Kuznetsov JV, Mordvin SS. Estimation of Road Pavement Durability by Dynamic Loading. *Transport Construction.* 2010;(2):15–17. (In Russ.).

4. Pratelli C, Betti G, Giuffrè T, Marradi A. Preliminary In-Situ Evaluation of an Innovative, Semi-Flexible Pavement Wearing Course Mixture Using Fast Falling Weight Deflectometer. *Materials.* 2018;11(4):611. https://doi.org/10.3390/ma11040611

5. Manosalvas-Paredes M, Navarro Comes A, Francesconi M, Khosravifar S, Ullidtz P. Fast Falling Weight Deflectometer (FastFWD) for Accelerated Pavement Testing (APT). In book: *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, 1st edition. London: CRC Press; 2017. 394 p. https://doi.org/10.1201/9781315100333

6. Chou CP, Lin YC, Chen AC. Temperature Adjustment for Light Weight Deflectometer Application of Evaluating Asphalt Pavement Structural Bearing Capacity. *Transportation Research Record.* 2017;2641(1):75–82. https://doi.org/10.3141/2641-10

7. Damnjanovic I, Zhang Z. Determination of Required Falling Weight Deflectometer Testing Frequency for Pavement Structural Evaluation at the Network Level. *Journal of Transportation Engineering.* 2006;132(1). https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:1(76)

8. Deng Y, Luo X, Zhang Y, Lytton R. Determination of Complex Modulus Gradients of Flexible Pavements Using Falling Weight Deflectometer and Artificial Intelligence. *Materials and Structures.* 2020;53(4):100. https://doi.org/10.1002/stc.2671

9. Khan ZH, Tarefder RA, Hasan MA. Field Characterization of Pavement Materials Using Falling Weight Deflectometer and Sensor Data from an Instrumented Pavement Section. *Transportation Research Record*. 2020;2674(4):036119812091192. https://doi.org/10.1177/0361198120911926

10. Ingrassia LP, Cardone F, Ferrotti G, Canestrari F. Monitoring the Evolution of the Structural Properties of Warm Recycled Pavements with Falling Weight Deflectometer and Laboratory Tests. *Road Materials and Pavement Design.* 2021;22(1):S69-S82. http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2021.1906302

11. Bech N. *Use of Falling Weight Deflectometer Testing in the Pavement ME AC/AC Overlay Design Procedure.* Master's Thesis. University of Pittsburgh; 2018. 375 p.

12. Sullivan B, Rickards I, Yousefdoost S. Interconversion of Laboratory Measured Modulus Results to Feld Modulus and Strain. In: *Proceedings of the AAPA International Flexible Pavements Conference*. Brisbane; 2013.

13. Vorovich II, Babeshko VA, Pryahina OD. *Dynamics of Massive Bodies and Resonant Phenomena in Deformable Medium.* Moscow: Nauchnyj mir; 1999. 220 p. (In Russ.).

14. Babeshko VA, Glushkov EV, Zinchenko ZF. *Dynamics of Non-homogeneous Linear-Elastic Medium. Moscow*: Nauka; 1989. 344 p. (In Russ.).

15. Iliopolov SK, Seleznev MG, Uglova EV. *Dynamics of Road Structures.* Monograph. Rostov-on-Don: Rostov State University of Civil Engineering; 2002. 258 p. (In Russ.).

16. Grundmann H, Lieb M, Trommer E. The Response of a Layered Half-space to Traffic Loads Moving Along its Surface. *Archive of Applied Mechanics.* 1999;69:55–67. https://doi.org/10.1007/s004190050204

17. Xu Q, Prozzi JA. A Time-domain Finite Element Method for Dynamic Viscoelastic Solution of Layered-half-space Responses under Loading Pulses. *Computers and Structures.* 2015;160:20–39. http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.07.005

18. Schanz M. Poroelastodynamics: Linear Models, Analytical Solutions, and Numerical Methods. *Applied Mechanics Reviews.* 2009;62(3):030803. http://dx.doi.org/10.1115/1.3090831

19. Uglova EV, Tiraturyan AN, Lyapin AA. Integrated Approach to Studying Characteristics of Dynamic Deformation on Flexible Pavement Surface Using Nondestructive Testing. *PNRPU (Perm National Research Polytechnic University) Mechanics Bulletin.* 2016;(2):111–130. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.08 (In Russ.).

20. Tiraturyan AN, Uglova EV, Nikolenko DA, Nikolenko MA. Model for Determining the Elastic Moduli of Road Pavement Layers. *Magazine of Civil Engineering.* 2021;(3):10308. https://doi.org/10.34910/MCE.103.8

21. Lyapin AA, Parinov IA, Buravchuk NI, Cherpakov AV, Shilyaeva OV, Guryanova OV. *Improving Road Pavement Characteristics: Applications of Industrial Waste and Finite Element Modelling.* Cham: Springer Nature; 2020. 236 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59230-1

22. Uglova E, Tiraturyan A. Calculation of the Damping Factors of the Flexible Pavement Structure Courses According to the In-place Testing Data. *Procedia Engineering.* 2017;187:742–748. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.431

Поступила в редакцию 24.09.2023
Поступила после рецензирования 13.10.2023
Принята к публикации 19.10.2023

Об авторах:

Тиратурян Артем Николаевич, профессор кафедры «Автомобильные дороги» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, доцент, ScopusID, ORCID, tiraturjan@list.ru

Воробьев Андрей Викторович, инженер кафедры «Автомобильные дороги» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, andreyvorobyev19@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А.Н. Тиратурян — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, научное руководство, анализ результатов исследований, формирование выводов.

А.В. Воробьев — подготовка текста, доработка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 24.09.2023
Revised 13.10.2023
Accepted 19.10.2023

About the Authors:

Artem N. Tiraturyan, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ORCID, tiraturjan@list.ru

Andrey V. Vorobiev, Engineer of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, andreyvorobyev19@mail.ru

Claimed contributorship:

Tiraturyan AN — formulating the main concept, aim and objectives of the research, carrying out calculations, scientific supervision, analysis of the research results, formulating the conclusions.

Vorobiev AV — preparing the text, refining the text, formulating the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ



Check for updates

Научная статья

УДК 71.711.00

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-115-126

Особенности формирования территорий ботанических садов как ландшафтных объектов

Н.С. Селетков **, И.Л. Вяликов, А.М. Воробьева** 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ rostland@mail.ru

Аннотация

Введение. Ботанические сады являются своеобразными научно-исследовательскими учреждениями, способствующими сохранению и интродукции различных видов растений. Они прошли большой временной путь своего развития и играют важную роль в организации рекреации для населения в природном каркасе городов. Исследования показали, что в ботанических садах, наряду с научно-исследовательской деятельностью, значительная роль отводится архитектурно-планировочной и ландшафтно-пространственной организации территорий, что способствует рациональной организации территорий ботанических садов и их функционированию. Целью данной научной работы является анализ и выявление основных принципов формирования территорий ботанических садов юга России, их функциональной организации и современного развития, которые до настоящего времени не рассматривались.

Материалы и методы. Проведен сравнительный анализ состояния территорий ботанических садов во времени и пространстве, комплексный системный анализ эволюции архитектурно-планировочных и ландшафтных особенностей территорий ботанических садов юга России и принципов их проектирования с точки зрения ландшафтной архитектуры. При проведении исследований по оценке состояния территории Ботанического сада ЮФУ в г. Ростове-на-Дону были использованы графоаналитические методы, а также авторские графические материалы по реконструкции планировочной структуры Ботанического сада ЮФУ.

Результаты исследования. Определены основные временные исторические этапы становления ботанических садов в России. Впервые была проанализирована эволюция архитектурно-планировочной и ландшафтной организации ботанических и дендрологических садов южного региона России. Результаты исследования позволили утверждать, что при проектировании и создании ботанических садов недостаточно учитывалась рекреационная роль территорий и принципы их организации как ландшафтных объектов. Сформулированы основные принципы формирования территорий ботанических садов южного региона России. На примере ботанического сада ЮФУ г. Ростова-на-Дону выявлены особенности формирования его территории, создания коллекционного фонда, дендрария и т. д. Определены недостатки и преимущества зонирования его территории с точки зрения его формирования как ландшафтного объекта. Даны концептуальные предложения по преобразованию его территорий.

Обсуждение и заключение. Авторами были систематизированы данные по историческим периодам становления и эволюции ботанических садов в России, что позволит учитывать эти особенности при реконструкции их территорий. Впервые для ботанических и дендрологических садов южного региона рассмотрены особенности их формирования как ландшафтных объектов, предназначенных для рекреационных целей. Сформулированные принципы формирования функциональных зон в ботанических садах юга России позволят повысить их архитектурно-художественный и ландшафтный облик. Для территории ботанического сада ЮФУ г. Ростова-на-Дону даны концептуальные проектные предложения, основанные на материалах данного исследования.

Ключевые слова: ботанический сад, территория, функция, ландшафтная архитектура, композиция, растительность

Для цитирования. Селетков Н.С., Вяликов И.Л., Воробьева А.М. Особенности формирования территорий ботанических садов как ландшафтных объектов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):115–126. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-115-126

Original article

Specifics of Forming the Territories of Botanical Gardens as the Landscape Objects

Nikita S. Seletkov , Ivan L. Vyalikov, Alexandra M. Vorobyova ✉

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ rostland@mail.ru

Abstract

Introduction. Botanical gardens are the special research institutions fostering the conservation and introduction of various plant species. They have gone a long way in their development and play an important role in organisation of people's recreation within the urban nature-based framework. The research revealed, that in the botanical gardens the research activities are combined with the considerable work on the architectural planning and landscape-spatial arrangement of territories, all contributing to the rational layout and functioning of the botanical gardens. The aim of the present research is to analyse and identify the main principles of forming the territories of botanical gardens in the south of Russia, find out their functional set-up and modern trends of development, which have not been studied before.

Materials and Methods. The comparative analysis of the state of territories of botanical gardens per time and space, the integrated system analysis of the architectural planning and landscape evolution features of the territories of botanical gardens of the south of Russia and the principles of their design from perspective of the landscape architecture, were carried out. When conducting the evaluative research of the territory of the Botanical Garden of the Southern Federal University in Rostov-on-Don, the graph analytics methods were used, as well as the authors' graphic materials on reconstruction of the SFU Botanical Garden structure.

Results. The main historical stages in the timeline of botanical gardens' formation in Russia were determined. The evolution of the architectural planning and landscape arrangement of the botanical and dendrological gardens in the southern region of Russia was analysed for the first time. The results of the study allowed making a conclusion about the insufficient consideration of the recreational role of the territories of botanical gardens and principles of their arrangement as the landscape objects during their design and creation. The main principles of forming the territories of botanical gardens in the southern region of Russia were formulated. By the example of the Botanical Garden of the Southern Federal University of Rostov-on-Don, the features of its territory formation, creation of the collection stock, arboretum, etc., were revealed. The disadvantages and advantages of zoning its territory, from perspective of forming it as a landscape object, were determined. Conceptual proposals for the transformation of its territories were given.

Discussion and Conclusion. The authors have systemised the data per historical periods of the botanical gardens' formation and evolution in Russia, which enables considering the revealed features during the reconstruction of such territories. For the first time the specifics of the southern region botanical and dendrological gardens' formation, as the landscape objects intended for recreational purposes, have been studied. The formulated principles of functional zoning of the botanical gardens of the south of Russia will enhance their architectural-artistic and landscape image. Based on the materials of this study, the conceptual design solutions for the territory of the Southern Federal University Botanical Garden of Rostov-on-Don have been provided.

Keywords: botanical garden, territory, function, landscape architecture, composition, vegetation

For citation. Seletkov NS, Vialikov IL, Vorobyeva AM. Specifics of Forming the Territories of Botanical Gardens as the Landscape Objects. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):115–126. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-115-126

Введение. Особое внимание к ботаническим садам в настоящее время определяется изменившимися экологическими условиями на городских территориях, что обуславливает необходимость сохранения генофонда и интродукции различных видов растений в особых условиях.

Первые ботанические сады были созданы в нашей стране более 250 лет тому назад. Они положили начало систематическому познанию растительного мира. Ботанические сады как своеобразные научные учреждения прошли значительный путь — от небольших «аптекарских огородов» петровских времен, когда в них выращивали, главным образом, лекарственные травы, до крупных исследовательских институтов, решающих проблемы экспериментальной ботаники. Организация и развитие ботанических садов и дендрологических парков неразрывно связаны с именами известных ученых, таких как Х.Х. Стевен, Ф.Б. Фишер, Э.Л. Регель, Р.Э. Трауфеттер, Р.И. Шредер, Л.Н. Бекетов, А.Н. Краснов, В.Л. Комаров, Б.И. Липский, Н.И. Кузнецов, Б.Л. Федченко, Е.Ф. Вульф и др.

С самого начала своего становления ботанические сады России занимались растительными сообществами с точки зрения «ботаников», проводя с ними различные эксперименты. Они создавали коллекции живых растений, изучали их природу, экологические особенности проживания и их способности приспосабливаться к новым условиям обитания, сохранения уникального растительного мира, расширения ассортимента растений и др. И до настоящего времени ботанические сады занимаются учебно-воспитательной и эколого-просветительской работой среди населения. Именно ботанические сады явились основоположниками привлечения и введения в культуру чая, цитрусовых, тунгового дерева, бамбука и многих других полезных растений, которые раньше отсутствовали во флоре нашей страны или имели весьма ограниченное распространение[1].

Вместе с тем ботанический сад — это прежде всего озелененная территория, имеющая сложную архитектурно-планировочную и ландшафтно-пространственную структуру, существенно отличающуюся своей спецификой от организации других объектов ландшафтного проектирования. Функция учреждения «Ботанический сад» в общей трактовке сводится к выполнению двух противоположных направлений в их работе: научно-исследовательского учреждения и парка с культурно-просветительским видом работ.

Коренным образом изменилось положение ботанических садов в нашей стране после Великой Октябрьской социалистической революции. Прогресс биологических наук, обусловленный бурным ростом общественного производства и культурного строительства, послужил мощным стимулом развития ботанических садов как научно-исследовательских учреждений, перед которыми поставлены большие задачи в области разработки научных основ сохранения и воспроизводства природных растительных ресурсов. В ботанических садах нашей страны, независимо от их ведомственной принадлежности, изучается проблема интродукции и акклиматизации растений. Теоретические основы этой отрасли ботаники заложены трудами Ч. Дарвина, Н.И. Вавилова, П.И. Мичурина, В.Л. Комарова, А.Н. Краснова и других выдающихся биологов, уделивших большое внимание закономерностям перемещении растений в новые районы с иными экологическими условиями.

Интродукция и акклиматизация растений превратились в обширную отрасль ботаники и растениеводства, перед которой ставилась задача изучить дикие растения, выбрать наиболее перспективные, выяснить возможность и целесообразность их переноса и введения в культуру в целях обогащения народного хозяйства новыми ценными видами. Введение растений в культуру — процесс длительный и сложный. Если проследить историю возделываемых растений, то можно убедиться, что путем испытания и отбора человек постепенно в течение тысячелетий накапливал в отвоеванных у природы растениях такие свойства, которые были необходимы для удовлетворения экономических и культурных потребностей. Современная наука и практика позволяют значительно сократить этот процесс, но все же введение в культуру каждого нового растения равносильно важнейшему открытию.

Данное направление работ учреждений «Ботанический сад» выявило недостаточное внимание к ландшафтным особенностям территории и их учета при разработке генеральных планов объектов при проектировании; решению вопросов взаимоувязки вышеуказанных двух функций; организации территории ботанического сада, удобной для научной и просветительской работы; обустройству территории так, чтобы она была комфортной в обслуживании посетителей, легко обозримой и оформленной в парковом отношении в художественно законченное произведение [1].

В настоящее время в базе данных Совета ботанических садов России значатся 107 ботанических садов и дендрологических парков (арборетумов) России, в т. ч. 40 ботанических садов в системе Министерства образования Российской Федерации. В южном регионе насчитывается 8 ботанических садов, из которых 5 созданы при университетах (ботанические сады при Южном федеральном университете, при Пятигорском медико-фармацевтического институте, при Кубанском государственном университете, при Кабардино-Балкарском государственном университете, при Волгоградском государственном педагогическом университете, дендрарий Адыгейского государственного университета).

Материалы и методы. В работе исследованы методы комплексного системного анализа эволюции архитектурно-планировочных и ландшафтных особенностей территорий ботанических садов юга России, функциональной организации их территорий. Применение комплексного изучения отечественной и зарубежной практики, опыта це-

[1] ГОСТ 28329-89 «Озеленение городов. Термины и определения». М. 1989.

ленаправленного преобразования ландшафта территорий ботанических садов с целью их устойчивого развития позволяет сформулировать временные этапы преобразования их территорий и принципы их архитектурно-планировочной и ландшафтно-пространственной организации территорий в целом и отдельных функциональных зон в частности. Использование комплексного подхода в сочетании с элементами факторного и системного анализа потребовало постановки самых различных задач: изучение архивных источников, научно-методической базы; натурное обследование ландшафта существующих ботанических садов южного региона и их отдельных участков территорий; фотофиксацию, обмеры и зарисовки; анализ состояния и степени сохранности ландшафта отдельных участков природы и их коллекций; обработку и анализ проектных материалов по существующему состоянию территорий ботанических садов; графическое моделирование; экспериментальное проектирование.

Результаты исследования. Анализ исторического опыта преобразования территорий ботанических садов показал, что основные этапы и принципы их формирования прежде всего связаны с историческими временными факторами, которые и определяет их эволюцию. В целом можно выделить четыре основных временных этапа организации архитектурно-планировочной и ландшафтно-пространственной структуры ботанического сада:

1. До IX в. Сформировались первые принципы создания коллекций растений в ранних садах Древнего Востока, когда в результате завоеваний новых территорий привозили экзотические растения наряду с золотом и рабами. И возникший в это время «сад удовольствий» приравнивался к ботаническому саду. Греками были составлены первые научные классификации растений. А в раннем Средневековье сформировался прообраз ботанического сада — «аптекарские огороды». Символом богатства и могущества хозяина было наличие в личных садах и парках экзотических растений.

2. XV–XVII в.в. Период многочисленных географических открытий эпохи Возрождения. В Европе появились частные ботанические сады, организованные на специально отведенных территориях. Академии наук, возникшие в Западноевропейских городах, создавали на своих территориях ботанические сады с целью проведения научных исследований. Впервые Лукасом Гини был предложен метод гербаризации растений. В России известны царские «красные» и «верховые сады» с коллекциями декоративных, лекарственных растений и деревьев.

3. XVIII–XIX в.в. С развитием науки в этот период сформировались основные принципы организации территорий ботанических садов. Они были связаны с расширением и углублением функций частных, университетских и медицинских ботанических садов, имеющих регулярную планировку. Но растущие социальные запросы и новые градостроительные условия определили использование территорий ботанических садов в целях отдыха. К этому времени садово-парковое искусство уже сформировалось, определились приемы паркостроения, механически перенесенные на основы организации территорий ботанических садов. Традиционное устройство университетских садов в форме огородов уступило место организации ботанических садов в форме парка, в котором выделялись отдельные небольшие участки утилитарного характера. Основная же часть коллекций, предназначавшаяся для научных экспериментов или учебного использования, формировалась по художественным законам и имела экспозиционный характер. Возникает сложное взаимодействие научного использования коллекций с их экспозиционной ролью.

4. XX–XXI в.в. Появились первые научные ботанические сады. Развитие научно-экспериментальной деятельности в них привело к выделению зоны, предназначенной только для практического использования. Парковая часть предназначалась для организации экспозиций и массово-информационной деятельности. Таким образом, взаимосвязанное развитие двух основных рассмотренных функций предопределило существование научно-экспериментальной и парковой зон в определенном отношении как самостоятельных и самодостаточных систем. Однако художественному аспекту при формировании парковых зон не уделяется достаточного внимания.

В процессе становления в России ботанических садов сложилась их типология, связанная с принадлежностью к направлению деятельности — ботанические сады при Российской Академии наук, ботанические сады при университетах и дендрарии [2–4]. Для всех них характерно взаимосвязанное развитие двух самостоятельных и самодостаточных зон — научно-экспериментальной и парковой.

Успешно развиваются ботанические сады и дендрарии при высших учебных заведениях. Сочетание учебной и научно-исследовательской работы дает весьма положительные результаты, что послужило основанием для предоставления статуса научно-исследовательского учреждения ботаническим садам Воронежского, Киевского, Ленинградского, Львовского, Московского, Одесского, Ростовского-на-Дону, Саратовского, Свердловского, Ташкентского, Томского, Харьковского, Черновицкого университетов[2,3].

Однако анализ истории создания планов ботанических садов южного региона показал, что при их создании приглашали к участию архитекторов не для всех объектов. Так, например, старейший Сочинский дендрарий организован в 1892 году. Планировку парка площадью 15 га осуществил хозяин участка — коллекционер и драматург С.Н. Худеков вместе со своим другом садовником К.А. Лангау. Парк строился по типу франко-итальянских террасных парков конца XIX века и постоянно пополнялся новыми растениями. Парк также украсили скульптуры

[2] Горохов В.А. *Зеленая природа города: учебное пособие для вузов.* М.: Архитектура-С; 2005. 228 с. URL: https://tehne.com/library/gorohov-v-zelenaya-priroda-goroda-moskva-2005 (дата обращения 12.11.2023).
[3] Вергунов А.П., Денисов М.Ф., Ожегов С.С. *Ландшафтное проектирование: Учебное пособие для вузов по спец. «Архитектура».* М.: Высш.школа; 1991. 240 с.

и вазы, заказанные во Франции и отлитые из чугуна мастерами франко-итальянской компании А. Дюреном и П. Капелларо. Интересен прием организации пространства парка — в центральной его полосе, направленной в сторону моря, сосредоточены поляны, цветники, открытые видовые площадки. Ближе к флангам расположена основная масса высокой растительности. Такое ландшафтное построение связывает парк с панорамой моря, дает возможность широкого обзора и организует «интимные» пространства, затененные древесными кронами, стриженными и свободно растущими кустарниками. Наиболее ценные деревья в составе групп или поодиночке размещены вдоль опушек и на лужайках. Планировка ботанического сада характеризуется своеобразным сочетанием пейзажных и регулярных приемов. Вместе с тем он является экскурсионно-просветительским объектом. Сейчас дендрарий состоит из трех частей: нижней, средней и верхней. Парк «Дендрарий» является структурным подразделением ФГБУ «Сочинский национальный парк».

Дендрологический парк «Южные культуры» находится в Адлерском районе Большого Сочи (Россия). Парк был основан генералом Даниилом Васильевичем Драчевским на землях своего имения «Случайное», на территории площадью 11 га в 1910–1911 гг. по проекту талантливого садово-паркового архитектора А. Регеля. Архитектор использовал ландшафтный стиль с включением регулярных элементов в виде обширного партера в южной части парка, что было весьма характерно для направления садово-паркового искусства конца XIX — начала XX века. Оригинальным решением явилось применение регулярной разбивки не только вблизи дома, но и вдали от него, в глубине парка, что составило его архитектурный центр. Разбивкой в натуре и работами по посадкам руководил австрийский садовод Р.Ф. Скриваник. Главная красота парка заключается в подборе и расположении пород и оттенков зелени от свежего зеленого до темно-красного, разнообразии формы крон деревьев от плакучих до колоннообразных. Растения так искусно подобраны с учетом законов контраста и гармонии, что в некоторых местах от них трудно оторвать взгляд. Особенно красиво оформлены берега прудов.

Проект Ботанического сада Пятигорского медико-фармацевтического института в 1946 году был разработан отделом архитектуры города при участии ботаника Б.А. Алексеева.

Ботанический сад при Южном федеральном университете относится к категории ботанических садов университетов с преимущественно исследовательской функцией. Общая площадь территории 160,5 га. Он располагается в Железнодорожном административном районе Ростова-на-Дону.

В системе озеленения Ростова-на-Дону Ботанический сад занимает важное место. Благодаря тому, что его территория является охраняемой, недалеко от центральной части города сохранен большой зеленый клин, который способствует улучшению экологического состояния территории жилой городской застройки. Таким образом, и Советский район с запада, и Ленинский район с востока, и Железнодорожный район с юга и севера находятся в благоприятном соседстве с крупным парком.

Территория ботанического сада занимает преимущественно южный склон у ручья с подземным источником и ограничена жилой застройкой, садовыми участками. Подъезд к территории Ботанического сада осуществляется с улицы Лесопарковой. Он имеет крутой уклон. Второстепенный въезд на территорию ботанического сада осуществляется с западной стороны, с улицы Еременко (рис. 1, 2).

Ботанический сад основан в 1927 году по инициативе профессоров В.Ф. Хмелевского и В.Н. Вершковского. Выбор территории для Ботанического сада был обусловлен тем, что до революции на этом месте находилось успешное цветоводческое хозяйство братьев Рамм, голландцев по происхождению. Во время своего создания Ботанический сад был единственным учреждением соответствующего профиля в степной зоне юга России. Он стал первой базой для привлечения, изучения и пропаганды новых видов и форм растений. В 1971 г. Ботанический сад РГУ получил статус научного учреждения. Решением областного Совета народных депутатов в 1992 году Ботанический сад отнесен к числу государственных памятников природы регионального значения. Коллекция растений является одной из самых значительных в стране и единственной на юге России [7, 8].





Рис. 1. Современное состояние ботанического сада ЮФУ в г. Ростове-на-Дону



Рис. 2. Современное функциональное зонирование территорий Ботанического сада ЮФУ[4]

Архитекторов к проектированию Ботанического сада не привлекали. Проектированием руководил В.Н. Вершковский, который был в то время профессором Варшавского университета, а затем и Донского университета. Основной идеей, заложенной в проект ботанического сада, было воссоздать миниатюру карты Северного Кавказа. На территории задумывалось представить коллекции растений, характерных для климата Северного Кавказа. Но планы не осуществились, потому что растения попросту не смогли прижиться в ростовском климате и в первый же год погибли. О композиционном решении территории с учетом ее ландшафтных особенностей никто не задумывался.

На **первом этапе** создания Ботанического сада ЮФУ в экспозиционные зоны было решено заложить парк лесного типа на территории 30 га, дендрарий на 4,2 га и крупный древесно-декоративный питомник на 15 га. Дендрарий был расположен на разных участках, отличающихся по экспозиции склонов, почвам и уровню грунтовых вод. Экологические потребности растений стали главным фактором, влияющим на условия размещения в экспозиционных зонах.

На **втором этапе** проводился анализ коллекционного фонда. Именно тогда были созданы коллекции древесных растений, таких как орехоплодные, плодовые культуры, сирингарий и розарий. В 1982 году коллекция цветковых древесных растений включала порядка 1000 разновидностей.

На **третьем этапе** осваивался новый участок площадью 18 га, отведенный под строительство систематического дендрария. Коллекция систематического дендрария формировалась прогрессивным методом родовых комплексов, что способствовало ее быстрому росту.

Также к третьему этапу можно отнести создание коллекции хвойных растений. Коллекции содержали более ста видов хвойных растений, и многие виды отлично приспосабливались к климату Ростовской области.

Функциональный анализ современной территории Ботанического сада ЮФУ показал, что он не отвечает нормативным требованиям зонирования объектов данного профиля. Преобладают зоны экспозиции открытого грунта — коллекции хвойных растений, цветочных и лекарственных растений, плодовых и технических культур и другие. На участке со степной растительностью был организован заказник, который в настоящее время находится под угрозой уничтожения. Всего эта зона занимает 97,12 га, что составляет 60 % от общей площади.

[4] *Ботанический сад ЮФУ. Экспертно-консультационный центр «Ботаника».* URL: https://bg.sfedu.ru/uslugi2/landshaftnoe-proektirovanie.html (дата обращения: 08.10.2023)

Организованная парковая зона для тихого отдыха посетителей отсутствует, что обуславливает неорганизованное посещение выставочных участков с экспозициями растений и создает неблагоприятные условия для произрастания уникальных растений. Отсутствует хозяйственная зона. Ботанический сад ЮФУ нуждается в проведении реконструктивных мероприятий с учетом взаимодействия научной, учебно-экспериментальной и культурно-информационной зон. (рис. 3).



Рис. 3. Схема комплексного анализа территории Ботанического сада ЮФУ

Исследования показали, что при проектировании территорий ботанических садов необходим комплексный ландшафтный подход к формированию территорий. В условиях города, когда территория ботанического сада имеет важную рекреационную функцию, зона с естественной растительностью с заповедным или свободным использованием может составлять до 20 % территории, в то время как экспериментально-производственная зона — от 60 до 75 %, научно-исследовательская — 5–10 %. На территории со свободным использованием следует выделять зону выставочных тематических ландшафтных садов, на которых могут быть показаны основные ландшафтные приемы формирования сада и ассортимент растений для их реализации.

В рамках дипломного проектирования в Школе архитектуры и дизайна Донского государственного технического университета на кафедре «Градостроительство и проектирование зданий» разрабатывается проект реконструкции территории ботанического сада ЮФУ, в котором основной аспект уделяется территории как к ландшафтному объекту (рис. 4–8).



Рис. 4. Схема проектного предложения по реорганизации территории поймы Темерника в Ботаническом саду ЮФУ

Рис. 5. Концептуальные предложения по развитию архитектурно-планировочной и ландшафтно-рекреационной функций территории Ботанического сада ЮФУ



Рис. 6. Аквасад с оранжереей в пойме реки Темерник



Рис. 7. Аллея роз на береговой линии реки Темерник



Рис. 8. Главная аллея с видом на смотровую площадку

Обсуждение и заключение. Полученные данные исследования позволили определить основные этапы становления, эволюции ботанических садов и принципов их проектирования, которые связаны с историческими временными факторами. Результаты исследований различных типов ботанических садов показали, что, независимо от их принадлежности к Российской Академии наук или университетам, для них характерно взаимосвязанное развитие двух самостоятельных и самодостаточных зон — научно-экспериментальной и парковой. Наличие парковой зоны в ботанических садах определяет необходимость их проектирования как ландшафтных объектов.

Особую роль приобретают эти выводы для юга России с благоприятными климатическими условиями, которые позволяют широко использовать парковую зону под рекреацию горожан. В настоящее время к их проектированию не всегда привлекают архитекторов, что сказывается на художественном уровне их ландшафтной организации. Расширение функциональной составляющей территорий ботанического сада введением выставочной зоны тематических садов усилит также роль ботанических садов в образовании архитектурно-дизайнерской школы.

Специфику архитектурно-ландшафтной организации современных ботанических садов юга России определяет взаимодействие основных функций: экспериментально-производственной (питомники, опытные поля, оранжерейно-тепличное хозяйство, экспериментальные участки, хоздвор и т. п.) и экспозиционно-парковый (коллекции живых растений в открытом и закрытом грунте). Такие экспозиции могут являться наглядным пособием для обучения не только студентов биологов, но и ландшафтных архитекторов и ландшафтных дизайнеров. Как следствие, возникает необходимость взаимодействия ботанических садов с образовательными организациями художественной направленности (архитектурными и дизайнерскими вузами).

Предлагаемые концептуальные предложения по реконструкции территории ботанического сада Южного федерального университета позволят решить вопросы рекреационной и образовательной политики, провести более детальную проработку рекреационной составляющей его территории с учетом ее ландшафтных особенностей, что позволит не только сохранить коллекционный фонд, но и обеспечит комфортные условия для научно-исследовательской работы.

Список литературы

1. Vorobyeva A.M. Evolution of Landscape Architecture. *Materials Science Forum.* 2018;931:856–861. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.856

2. Вардуни Т.В., Дмитриев П.А., Капралова О.А. Роль ботанических садов в сохранении и мониторинге биоразнообразия. В: *Сборник материалов Международной научной конференции, посвященной 100-летию Южного федерального университета.* Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет; 2015. 5 с. URL: https://npsochi.ru/upload/iblock/a9b/w3iq4txvm203zc5mou4cvps8xgq80z4w.pdf (дата обращения: 12.10.2023).

3. Мальцева А.Н., Бурлуцкая Л.В., Полтавский А.Н. *Ботанический сад Южного федерального университета. История создания и достижения к 85-летию со дня основания.* Ростов-на-Дону: ИПО ПИ ЮФУ; 2012. 170 с.

4. Vorobyeva A.M. Features of the Transformation of Urban Facilities during the Reconstruction of Territories. *XIV International Scientific and Practical Conference "State and Prospects for the Development of the Agro-industrial Complex — INTERAGROMASH 2021"*. 2021;273:06011. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127306011

5. Vorobeva A.M. The Place History Reading in the Image of the Urban Areas' Formed Public Space. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;913:032004. https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/3/032004

6. Куликов Г.А., Сорокина Т.И. *Ландшафтная архитектура Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН: история и перспективы. К 70-летию со дня образования*. Москва: КМК; 2015. 200 с.

7. Пакина А.А. Проблемы и перспективы экологического мониторинга ботанических садов и дендрологических парков. В сб.: *Методические рекомендации по экологическому мониторингу недвижимых объектов культурного наследия.* Москва: Институт Наследия; 2001. С. 62–68.

8. *Информ. бюлл. Совета ботанических садов России и Отделения международного совета по охране растений.* 2000;11:38–47. URL: https://www.bgci.org/files/Russia/Images/issue15.pdf (дата обращения 12.10.2023).

9. Андреев Л.Н., Бер М.Н., Егоров А.А., Камелин Р.В., Лурье Е.А., Прохоров А.А. и др. Ботанические сады и дендрологические парки высших учебных заведений. *Hortus botanicus*. 2006;3:5–27. URL: https://elibrary.petrsu.ru/books/60565 (дата обращения 14.10.2023).

References

1. Vorobyeva AM. Evolution of Landscape Architecture. *Materials Science Forum*. 2018;931:856–861. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.856

2. Varduni TV, Dmitriev PA, Kapralova OA. Role of Botanical Gardens in Biodiversity Conservation and Monitoring. In: *Proceedings of the International Scientific Conference in Honour of 100 Anniversary of the South Federal University.* Rostov-on-Don: Southern Federal University; 2015. 5 p. (In Russ.). URL: https://npsochi.ru/upload/iblock/a9b/w3iq4txvm203zc5mou4cvps8xgq80z4w.pdf (accessed: 12.10.2023).

3. Maltseva AN, Burlutskaya LV, Poltavskii AN. *Botanical Garden of the Southern Federal University. History of Creation and Achievements to the 85th Anniversary of its Foundation.* Rostov-on-Don: IPO PI SFU; 2012. 170 p. (In Russ.).

4. Vorobyeva AM. Features of Urban Facilities Transformation during Territory Reconstruction. In: *Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference "State and Prospects for the Development of the Agribusiness — INTERAGROMASH 2021"*. 2021;273:06011. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127306011

5. Vorobeva AM. The Place History Reading in the Image of the Urban Areas' Formed Public Space. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;913:032004. https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/3/032004

6. Kulikov GA, Sorokina TI. *Landscape Architecture of the Main Botanical Garden Named After N.V. Tsitsin RAS: History and Prospects. Dedicated to the 70th Anniversary of Formation.* Moscow: KMK; 2015. 200 p. (In Russ.).

7. Pakina AA. Problems and Prospects of Ecological Monitoring of Botanical Gardens and Dendrological Parks. In: *Guidelines for Environmental Monitoring of Estate Property Objects of Cultural Heritage*. Moscow: Russian Heritage Institute; 2001. P. 62–68. (In Russ.).

8. *Newsletter of the Council of Botanical Gardens of Russia and Moscow Division of Botanic Gardens.* 2000;11:38–47. (In Russ.). URL: https://www.bgci.org/files/Russia/Images/issue15.pdf (accessed 12.10.2023).

9. Andreev LN, Ber MN, Egorov AA, Kamelin RV, Lurie EA, Prohorov AA, et al. Botanical Gardens and Dendrological Parks of Higher Educational Institutions. *Hortus botanicus*. 2006;3:5–27. (In Russ.). URL: https://elibrary.petrsu.ru/books/60565 (accessed 14.10.2023).

Поступила в редакцию 20.10.2023
Поступила после рецензирования 06.11.2023
Принята к публикации 10.11.2023

Об авторах:

Селетков Никита Сергеевич, студент группы АШГР 51 Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, sergey.georgiev@bk.ru

Вяликов Иван Леонидович, декан факультета «Школа архитектуры и дизайна» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, vialikov@mail.ru

Воробьева Александра Максимовна, профессор кафедры «Градостроительство и проектирование зданий» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат архитектуры, профессор, ORCID, rostland@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Селетков Н.С. — анализ результатов исследований, подготовка текста и графических материалов;
Вяликов И.Л. — формирование основной концепции, цели и задачи исследования;
Воробьева А.М. — формирование основной концепции, научное руководство, подготовка текста и выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 20.10.2023
Revised 06.11.2023
Accepted 10.11.2023

About the Authors:
Nikita S. Seletkov, Student of Group АШГР 51, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, sergey.georgiev@bk.ru
Ivan L. Vyalikov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Dean of the Architecture, Design and Art School Faculty, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), vialikov@mail.ru
Aleksandra M. Vorobyova, Cand.Sci. (Architecture), Professor of the Urban Planning and Buildings Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, rostland@mail.ru

Claimed contributorship:
Seletkov NS — analysis of the research results, preparing the text and graphic materials;
Vyalikov IL — formulating the main concept, aims and objectives of the research;
Vorobyova AM — formulating the main concept, scientific supervision, preparing the text and conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА



Check for updates

Научная статья

УДК 697.94

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-127-136

Разработка алгоритма увеличения жизненного цикла систем кондиционирования воздуха (СКВ)

В.И. Беспалов ✉, **Ю.Ю. Ткачева** ✉, **А.И. Николаев**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ izos-rgsu@mail.ru, ✉ tkachevayu@yandex.ru

Аннотация

Введение. В качестве научной проблемы авторами выделена необходимость анализа и оценки жизненного цикла систем кондиционирования воздуха (СКВ) для разработки оптимальной технологии создания микроклимата в помещении, благоприятствующего производительному труду, отдыху людей и нормальному протеканию технологических процессов. Целью работы явилось исследование жизненного цикла СКВ как объекта обеспечения комфортного микроклимата помещений в структуре градостроительных комплексов различного назначения.

Материалы и методы. В основу исследований авторами положены методы математического и системного анализа для увеличения жизненного цикла объектов обеспечения микроклимата помещений.

Результаты исследования. В результате исследований установлены основные этапы жизненного цикла, определена их связь с соответствующими характеристиками функционирования СКВ, предложены формулы по определению критериев и безразмерных показателей оценки работы системы обеспечения микроклимата.

Обсуждение и заключение. Выполненный анализ поиска резервов увеличения жизненного цикла позволил установить, что этап эксплуатации СКВ представляет наибольшие возможности с точки зрения выбора оптимальной компоновки функциональных блоков системы и технологии кондиционирования. Определены и описаны формулы критериев и соответствующих им безразмерных показателей для разработки рекомендаций и способов увеличения жизненного цикла СКВ.

Ключевые слова: микроклимат, тепловлажностная обработка воздуха, системы кондиционирования воздуха, функциональные блоки системы, конструктивное исполнение, увеличение жизненного цикла, надежность и долговечность систем

Для цитирования. Беспалов В.И., Ткачева Ю.Ю., Николаев А.И. Разработка алгоритма увеличения жизненного цикла систем кондиционирования воздуха (СКВ). *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):127–136. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-127-136

Original article

Development of the Life Cycle Extension Algorithm of the Air Conditioning Systems (ACS)

Vadim I. Bespalov ✉, **Yuliya Yu. Tkacheva** ✉, **Aleksandr I. Nikolaev**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ izos-rgsu@mail.ru, ✉ tkachevayu@yandex.ru

Abstract

Introduction. The scientific problem tackled by the authors is the need to analyse and evaluate the life cycle of the air conditioning systems (ACS) for developing an optimal technology of creating the favourable indoor climate, which enables people's productive work and rest as well as the normal flow of the technological processes. The study aimed at

investigating the life cycle of an ACS as a facility of the comfortable indoor climate provision within the urban mixed-use complexes.
Materials and Methods. The authors' research is based on the methods of mathematical and system analysis used to find out the solution for extending the life cycle of the indoor climate provision facilities.
Results. As a result of the research, the ACS main life cycle stages were distinguished, their relations to the respective operational parameters were determined, the formulas for calculating the criteria and nondimensional indicators of the indoor climate provision system's operation assessment were proposed.
Discussion and Conclusion. The carried out analysis on distinguishing the life cycle extension capacities allowed us to conclude that the ACS operational stage provides the best opportunities for selecting the optimal layout of the system functional units and the air conditioning technology. The formulas for calculating the criteria and their respective nondimensional indicators enabling the development of the recommendations and ways of extending the ACS life cycle have been determined and described.

Keywords: indoor climate, air thermal and humidity treatment, air conditioning systems, system functional units, structural design, life cycle extension, reliability and durability of the systems.

For citation. Bespalov VI, Tkacheva YYu, Nikolaev AI. Development of the Life Cycle Extension Algorithm of the Air Conditioning Systems (ACS). *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(4):127–136. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-127-136

Введение. К числу значимых научных проблем относятся повышение эффективности жизненного цикла и выбор конструкции таких СКВ, которые бы обладали свойствами конструктивной и компоновочной функциональности и надежности.

Функциональными блоками, составляющими конструкцию СКВ, являются унифицированные компоненты: средства забора воздуха, камеры фильтрации и смешения, теплообменники (воздухоохладители и воздухонагреватели), конденсаторы и испарители, компрессоры, увлажнители и осушители, устройства для перемещения и распределения воздуха, средства хладо-, тепло- и энергоснабжения, автоматики, дистанционного управления и контроля [1, 2].

В СКВ каждый функциональный блок (узел) влияет напрямую и взаимообратно на жизненный цикл системы. В представленной работе жизненный цикл исследован нами как многоэтапное чередование сменяющихся состояний и событий, происходящих во времени.

Выбор из существующего многообразия конструктивных исполнений СКВ оптимального решения с точки зрения долговечности и эффективности жизненного цикла должен основываться на системном и комплексном подходе. Это означает, что необходимо разработать обоснованную последовательность такого выбора на основе учета комплекса требований к обеспечению микроклимата помещений и оценки функционирования СКВ на всех этапах жизненного цикла объекта.

Известно, что жизненный цикл систем теплоснабжения и обеспечения микроклимата зданий в соответствии с «кругом качества» включает 11 этапов [3]. Нами же предложено для СКВ использовать укрупненную схему жизненного цикла (рис. 1), которая охватывает пять этапов, обладающих наибольшей значимостью: проектирование, производство (конструкций, блоков и узлов), строительство, эксплуатация и утилизация.

Проектный этап жизненного цикла СКВ можно называть стадией «инвестиционного замысла». На этом этапе формируются требования к СКВ и микроклимату помещений, которые они обслуживают. На этапе проектирования необходимо определить санитарно-гигиенические, экономические показатели и возможность их достижения [4].

На этапе производства требуется выполнение организационно-технологических решений, характеризуемых соответствующими расходными и мощностными параметрами функционирования СКВ.

Этап строительства регламентируется монтажными характеристиками, в т. ч. объемно-планировочные и функционально-компоновочные [5].

Эксплуатация СКВ становится результатом конструктивно-компоновочной интеграции санитарно-гигиенических характеристик задаваемого микроклимата обслуживаемых помещений и монтажно-технологических характеристик используемого оборудования тепловлажностной обработки воздуха. Проведенный нами анализ эксплуатационного этапа жизненного цикла СКВ показал, что в качестве его характеристик следует использовать все перечисленные выше группы, имеющие разную физическую сущность, большой разброс возможных интервалов значений и разнообразную размерность.



Рис. 1. Основные этапы жизненного цикла СКВ

Следует определить способы увеличения жизненного цикла СКВ путем определения этапа, наиболее эффективно влияющего на продолжительность жизни, предложить формулы его оценки и построить соответствующий алгоритм.

Материалы и методы. Для достижения цели увеличения жизненного цикла СКВ решены следующие взаимосвязанные задачи:

− выделены основные этапы жизненного цикла СКВ, и установлена связь каждого этапа с соответствующими характеристиками;

− предложенные характеристики этапов жизненного цикла объединены в критерии оценки функционирования СКВ, критерии, в свою очередь, преобразованы в безразмерный показатель для результирующего выбора инструмента увеличения продолжительности жизненного цикла;

− построен алгоритм разработки комплекса мероприятий по увеличению продолжительности жизненного цикла СКВ.

На рис. 2 перечислены четыре группы характеристик оборудования систем обеспечения микроклимата, которые нами предлагается использовать при оценке компоновочного решения СКВ и определении способа увеличения долговечности и эффективности ее жизненного цикла.

Характеристики работы СКВ, учитываемые при оценке этапов жизненного цикла рассматриваемой инженерной системы обеспечения микроклимата помещений, объединены нами в 4 группы:

− санитарно-гигиенические характеристики микроклимата, обеспечиваемого СКВ. Это в первую очередь требования, предъявляемые к внутреннему воздуху помещений, а также фактические (обеспечиваемые функционированием СКВ) характеристики микроклимата;

− технологические характеристики оборудования СКВ, включающие максимальную площадь обслуживания помещений, обеспечиваемый расход воздуха, производительность холода, тепла, интенсивность осушки/увлажнения обрабатываемого воздуха;

− монтажные характеристики компоновочных решений СКВ, учитывающие возможность разнообразия планировки, состава функциональных блоков, увеличения длины холодопроводов, воздуховодов, зонирования обслуживаемых площадей и равномерность распределения подачи воздуха, а также объемно-планировочные требования монтажа;

− экономические характеристики, отражающие эффективность работы системы, а именно эффективность капитальных затрат и текущих операционных расходов, а также энергоэффективность в режимах охлаждения и обогрева.

Для существующего многообразия СКВ как по схемам исполнения, так и по составу функциональных блоков [8], численные значения четырех перечисленных выше групп характеристик отличаются разнообразной физической сущностью, размерностью, а также большим разбросом интервалов значений характеристик.

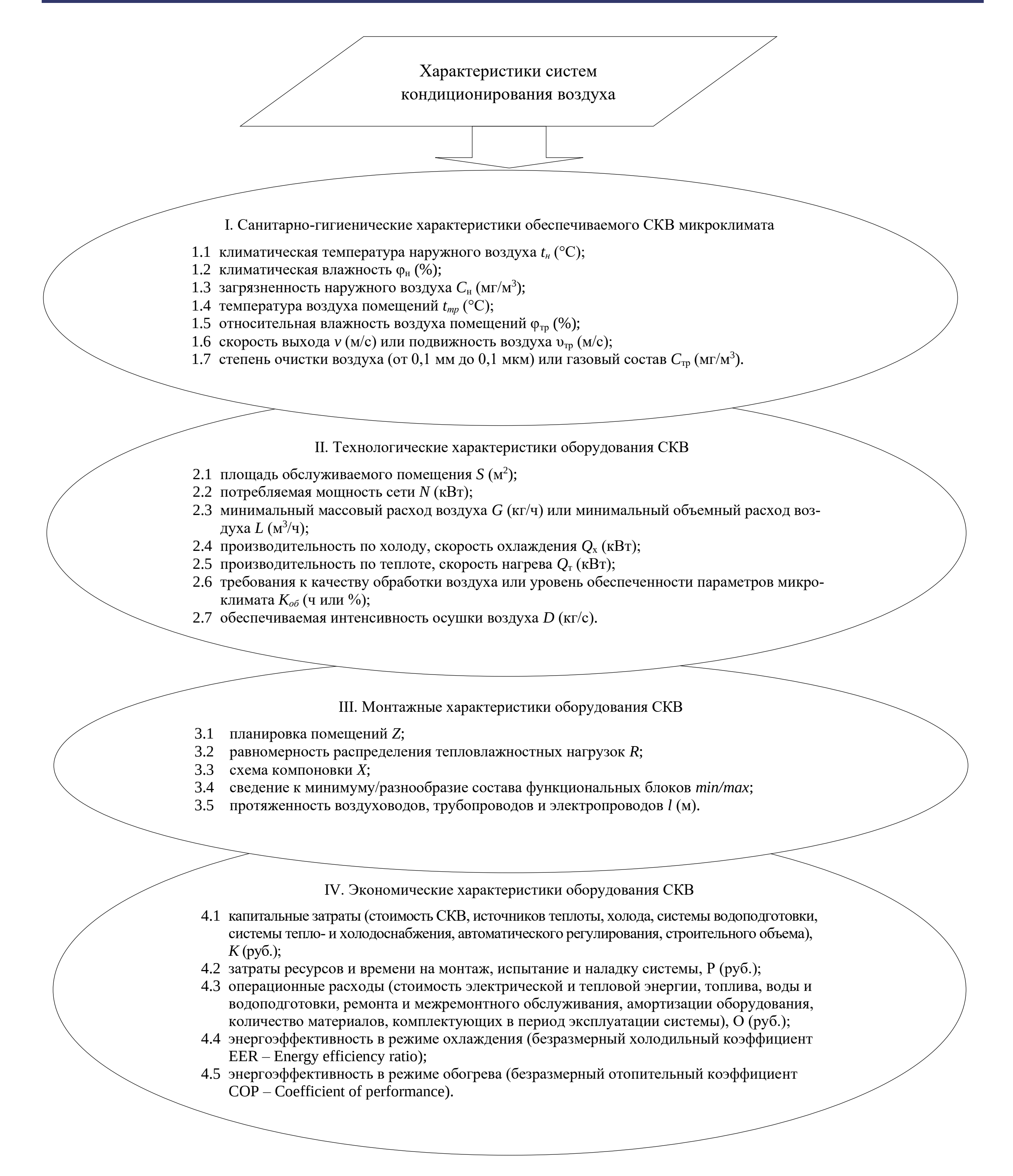


Рис. 2. Характеристики систем СКВ, используемые для контроля и оценки оборудования

При оценке и выборе оптимального конструктивного решения СКВ одно из главных мест занимает вопрос объединения имеющих различную размерность и физическую сущность величин, отражающих санитарно-гигиенические, технологические, монтажные и экономические характеристики СКВ, в единый безразмерный критерий работы СКВ.

Так как интервалы значений характеристик СКВ могут быть как узкими, так и широкими, соответствующий им критерий функционирования СКВ может принимать разнообразные по величине значения, поэтому нами предложено воспользоваться формулой желательности Харрингтона. Формула Харрингтона преобразует с помощью функции экспоненты безразмерные показатели, имеющие неограниченный интервал значений, в показатель

работы СКВ, изменяющийся в пределах от 0 (полное отсутствие эффекта) до 1 (максимальная эффективность жизненного цикла). Нормировать значения полученного показателя предлагается с помощью шкалы желательности, которая приведена в таблице 1.

Учитывая вышеизложенное, нами представлены формулы расчета трех критериев: санитарно-гигиенического критерия, критерия эффективности затрат, критерия энергоэффективности. Далее с помощью функции желательности Харрингтона предложено рассчитывать соответствующие показатели.

Таблица 1

Стандартные отметки на шкале желательности

Желательность	Отметки на шкале желательности
Очень плохо	0,00 — 0,20
Плохо	0,20 — 0,37
Удовлетворительно	0,37 — 0,63
Хорошо	0,63 — 0,80
Очень хорошо	0,80 — 1,00

Для обеспечения оптимальных санитарно-гигиенических требований микроклимата помещений следует приближать фактические параметры микроклимата к соответствующему оптимуму — требованиям температуры $t_в$, влажности $\varphi_в$, подвижности $\nu_в$ внутреннего воздуха [9].

Санитарно-гигиенический критерий предлагается нами рассчитывать, исходя из отношения фактических значений к требуемым оптимальным значениям с учетом весовых коэффициентов соответствующих параметров микроклимата по формуле:

$$K_{\text{сан-гиг}} = \left(\frac{t_в^{\text{факт}}}{t_в^{\text{тр}}}+1\right)^{B^t} \cdot \left(\frac{\phi_в^{\text{факт}}}{\phi_в^{\text{тр}}}+1\right)^{B^\phi} \cdot \left(\frac{\upsilon_в^{\text{факт}}}{\upsilon_в^{\text{тр}}}+1\right)^{B^\upsilon} - 1,$$

где $t_в^{\text{факт}}$ — фактическая температура внутреннего воздуха обслуживаемых системой кондиционирования помещений, °С; $\varphi_в^{\text{факт}}$ — фактическая влажность внутреннего воздуха обслуживаемых системой кондиционирования помещений, %; $\nu_в^{\text{факт}}$ — фактическая подвижность внутреннего воздуха обслуживаемых системой кондиционирования помещений, м/с; $t_в^{\text{тр}}$ — требуемая температура внутреннего воздуха обслуживаемых системой кондиционирования помещений, °С; $\varphi_в^{\text{тр}}$ — требуемая влажность внутреннего воздуха обслуживаемых системой кондиционирования помещений, %; $\nu_в^{\text{тр}}$ — требуемая подвижность внутреннего воздуха обслуживаемых системой кондиционирования помещений, м/с; B^j — весовой коэффициент компонента микроклимата помещения: температуры, влажности, подвижности воздуха соответственно.

Показатель санитарно-гигиенических характеристик рассчитывается путем математического экспонирования санитарно-гигиенического критерия, который при благоприятных условиях стремится к нулю ($K_{\text{сан-гиг}} \to 0$):

$$П_{\text{сан-гиг}} = 1 - e^{\left(-1/K_{\text{сан-гиг}}\right)}.$$

Критерий эффективности капитальных и текущих затрат объединяет капитальные затраты $З_{\text{кап}}$, затраты ресурсов на монтаж $З_{\text{монт}}$, операционные расходы $З_{\text{тек}}$, соотнося их с экономическим эффектом $Э_{\text{эф}}$ от использования СКВ. Критерий эффективности вложенных затрат предлагается нами рассчитывать по формуле:

$$K_{\text{эфф-затр}} = \frac{З_{\text{кап}} + З_{\text{монт}} + З_{\text{тек}}}{Э_{\text{эф}}},$$

где $З_{\text{кап}}$ — капитальные затраты (стоимость СКВ, источников теплоты, холода, системы водоподготовки, системы тепло- и холодоснабжения, электроснабжения, автоматического регулирования, строительного объема), руб.; $З_{\text{монт}}$ — затраты ресурсов на монтаж, испытание и наладку систем, руб.; $З_{\text{тек}}$ — операционные расходы (стоимость электрической и тепловой энергии, топлива, воды и водоподготовки, ремонта и межремонтного обслуживания, амортизации оборудования, количество материалов и комплектующих в период эксплуатации системы), руб.; $Э_{\text{эф}}$ — экономический эффект (выгода) от функционирования СКВ, руб.

Показатель эффективности капитальных и операционных затрат определяется математическим экспонированием соответствующего критерия:

$$П_{\text{эфф-затр}} = 1 - e^{\left(-1/K_{\text{эфф-затр}}\right)}.$$

Критерий энергоэффективности соотносит потребляемую СКВ мощность сети $N_{\text{потр}}$ с производительностью системы $Q_{\text{хол/тепл}}$, определяемой по количеству тепла, отводимого от охлаждаемого помещения в режиме охлаждения или подводимого в режиме обогрева. Критерий энергоэффективности предлагается рассчитывать по формуле:

$$K_{\text{энер–эфф}} = \frac{N_{\text{потр}}}{0{,}278 \cdot V_h \cdot q_v \cdot \lambda_v \cdot 10^{-3}},$$

где $N_{\text{потр}}$ — потребляемая мощность сети, кВт; V_h — часовой рабочий объем холодильной/тепловой системы, м^3/ч; q_v — удельная производительность холодильного/теплового агента, кДж/м^3; λ_v — безразмерный коэффициент подачи теплообменника.

Показатель энергоэффективности рассчитывается математическим экспонированием критерия энергоэффективности, который при благоприятных условиях стремится к нулю ($К_{\text{энер-эфф}} \to 0$):

$$П_{\text{энер–эфф}} = 1 - e^{\left(-1/K_{\text{энер–эфф}}\right)}.$$

Результаты исследования. Результаты процедуры ранжирования на основе предложенных показателей для трех из пяти основных этапов жизненного цикла СКВ (проектирование, строительство, эксплуатация), представлены на рис. 3. Проведенный нами анализ трех основных этапов жизненного цикла показал, что наибольшими значениями параметров обладает этап эксплуатации СКВ.

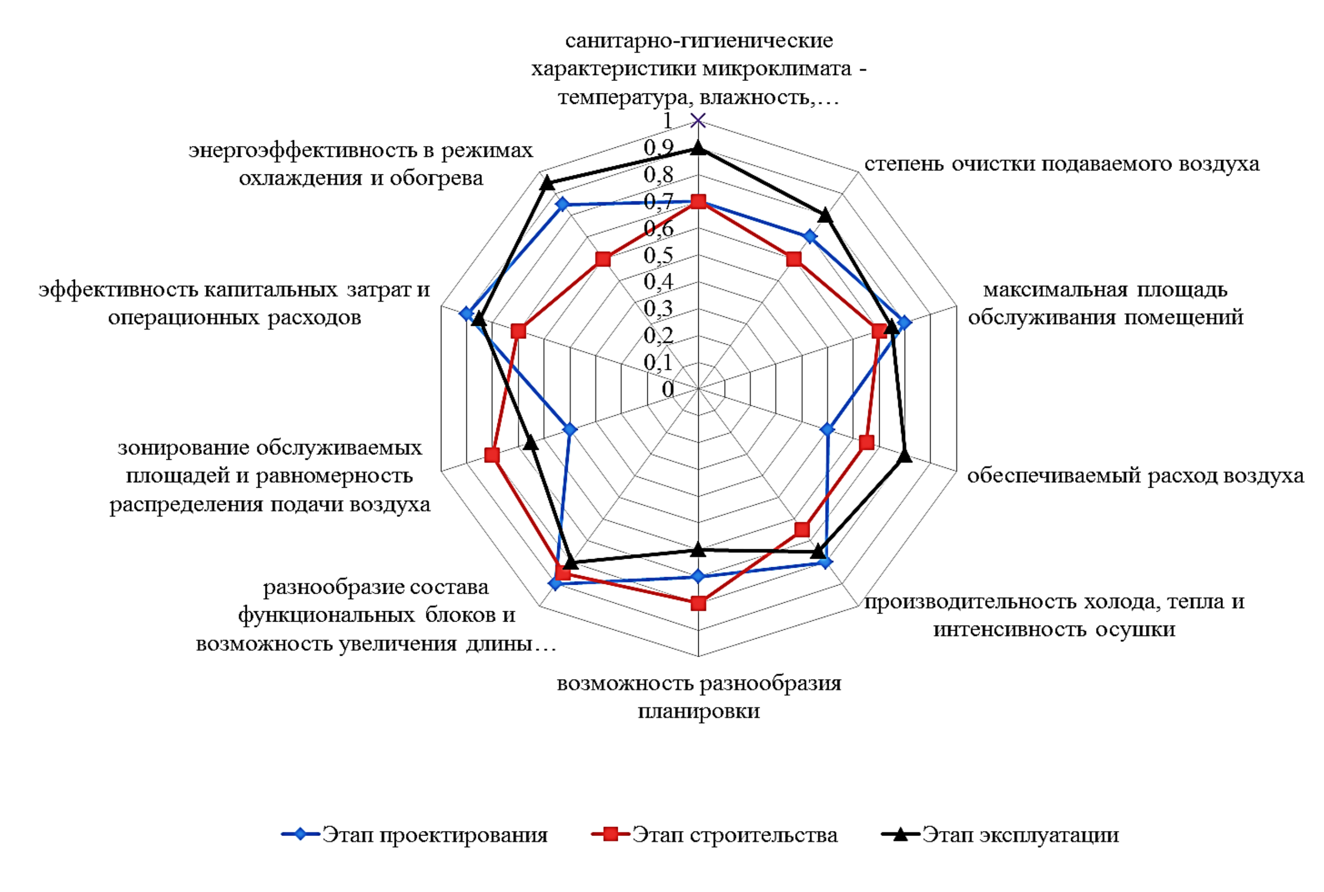


Рис. 3. Сравнительная диаграмма по результатам процедуры ранжирования этапов жизненного цикла на основе предложенных показателей работы СКВ

Факторы, от которых зависит комплектация СКВ, определяются в зависимости от используемых сменных функциональных блоков для выполнения рабочих и вспомогательных операций по тепловлажностной обработке воздуха. Из сменных функциональных блоков — агрегатов различного назначения — формируются технологические комплексы, при этом используются как базовые, так и дополнительные, вспомогательные блоки.

Согласно составленному нами «дереву задач» (рис. 4) для увеличения жизненного цикла СКВ, помимо перечисленных выше характеристик функционирования СКВ, следует учитывать характеристики надежности, а именно: наработку на отказ, контролепригодность, доступность блоков конструкции [10].

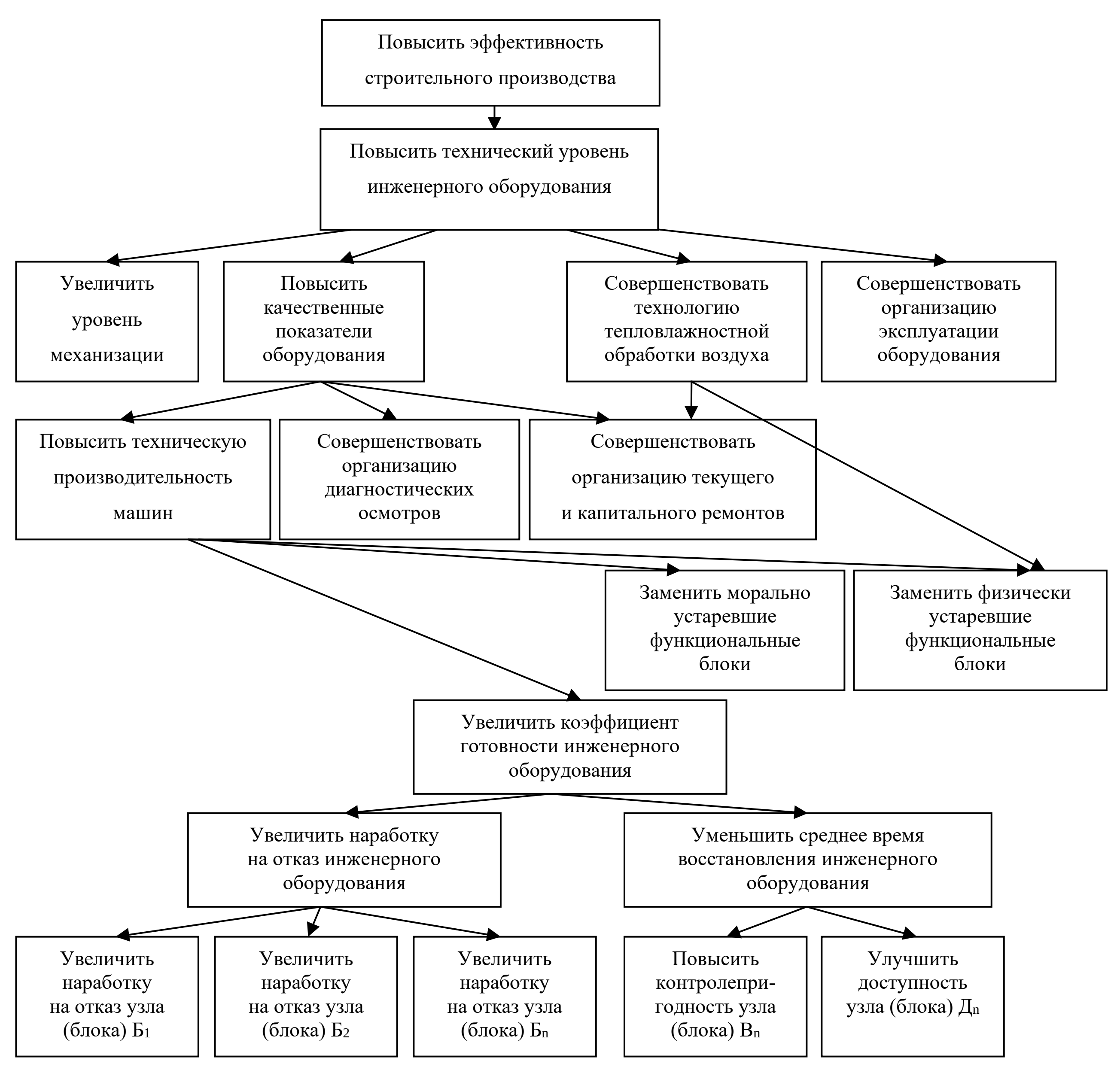


Рис. 4. Дерево задач увеличения надежности и продолжительности жизненного цикла СКВ

В качестве основных инструментов увеличения продолжительности эксплуатационного этапа жизненного цикла СКВ можно рекомендовать управление надежностью, долговечностью, ремонтопригодностью и обеспечением санитарно-технологических требований (в том числе управление обеспечением санитарно-гигиенического состояния микроклимата обслуживаемых помещений, а также безопасностью системы кондиционирования).

Обсуждение и заключение. На основе анализа статистических данных [6, 7], учитывающих продолжительность этапов жизненного цикла рассматриваемых систем, этап эксплуатации определен нами как этап, в наибольшей степени влияющий на продолжительность всего жизненного цикла.

Обсуждая результаты исследований можно заключить, что предложенный метод оценки жизненного цикла обладает рядом преимуществ:

1. Оценка жизненного цикла СКВ полностью отвечает задачам развития систем обеспечения микроклимата, в том числе с переменными параметрами технологического процесса, когда требуется осуществлять эффективное планирование и управление материальными ресурсами. Проводимые научные исследования направлены на развитие современного строительного производства.

2. В результате выполненного анализа нами установлены основные этапы жизненного цикла СКВ, выделены характеристики функционирования СКВ, определена связь каждого этапа жизненного цикла с соответствующими характеристиками.

3. Характеристики работы СКВ предлагается объединять в соответствующие критерии с последующим преобразованием критериев в безразмерный показатель, изменяющийся в пределах от 0 (полное отсутствие эффекта) до 1 (максимальная эффективность этапа жизненного цикла).

4. Результат проведенных исследований — разработан и построен алгоритм (методические основы) оценки жизненного цикла СКВ (рис. 5).

5. При использовании алгоритма оценки жизненного цикла СКВ возможно выявление принципов управления, направленных на увеличение эффективности жизненного цикла, улучшение санитарно-технологических параметров микроклимата обслуживаемых помещений, совершенствование систем обеспечения микроклимата.

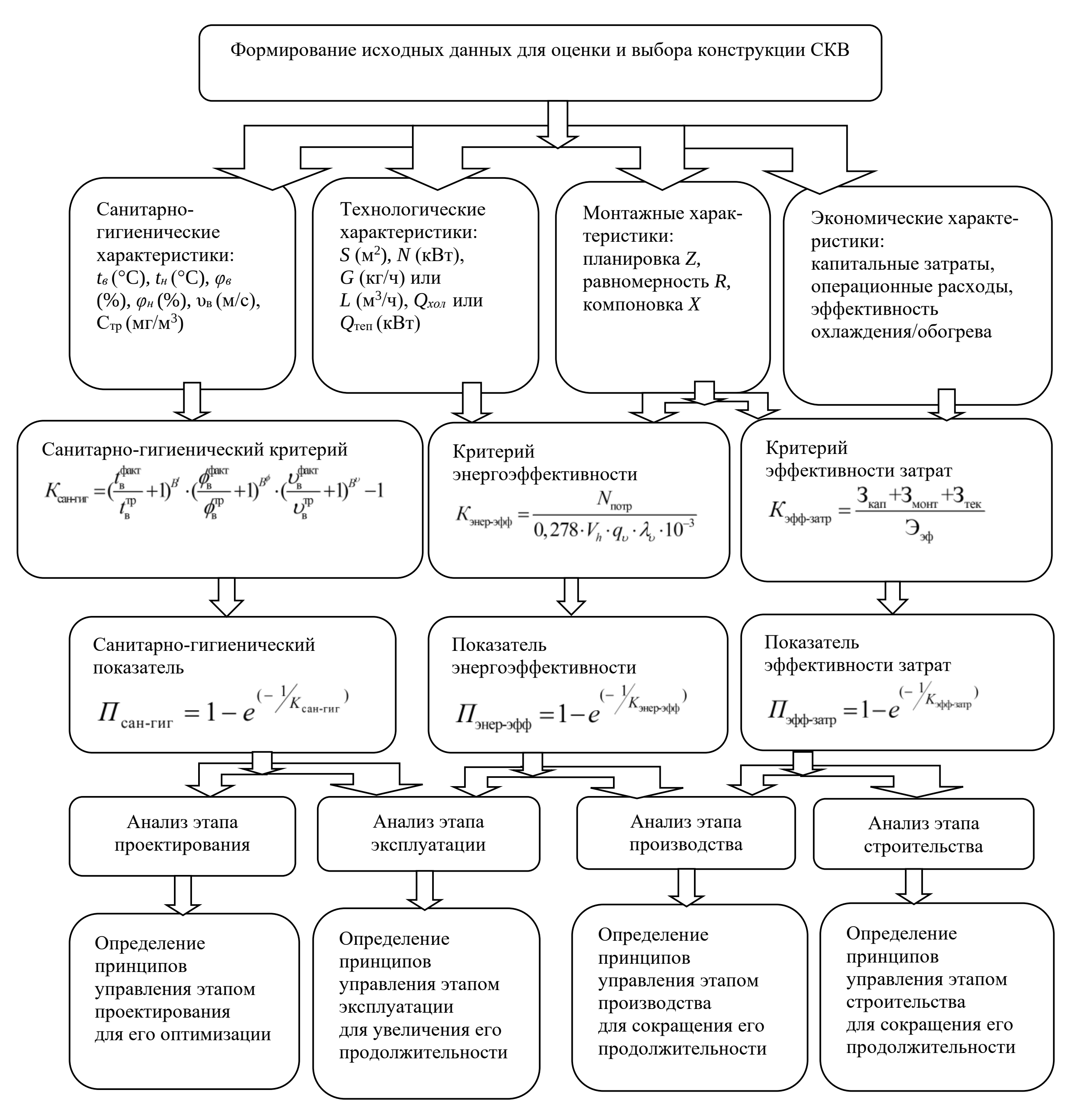


Рис. 5. Алгоритм оценки этапов жизненного цикла СКВ

Предложенный нами алгоритм оценки жизненного цикла СКВ может быть использован для разработки комплекса мероприятий по научно-обоснованному увеличению продолжительности эксплуатационного этапа жизненного цикла СКВ и поиску возможностей уменьшения продолжительности этапов производства и строительства, а значит повышению эффективности жизненного цикла в целом с последующей оптимизацией конструктивного и компоновочного исполнения СКВ.

Список литературы

1. Pozin B. The Principles of Life Cycle Supporting System for Mission-Critical System. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS.* 2018;30(1):103–114. https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2018-30(1)-7

2. Побирский Е.Ю., Галаев А.С., Филимонов И.С. Управление жизненным циклом изделия в производстве ракетно-космической техники. *Решетневские чтения.* 2012;2:633–634. https://elibrary.ru/item.asp?id=24376254 (дата обращения 03.10.2023).

3. Беспалов В.И., Гурова О.С., Лысова Е.П., Гришин Г.С. Анализ жизненного цикла парогазотурбинных ТЭЦ. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2022;1(4):32–43. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-32-43

4. Абрамян С.Г., Оганесян О.В., Сибирский Е.В. Энергоэффективная реконструкция на различных этапах жизненного цикла строительной системы. *Инженерный вестник Дона.* 2022;1(85):459–469. http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7430 (дата обращения 03.10.2023).

5. Варнаков Д.В., Козлов С.Ю., Васильев А.Ю. Теоретическое обоснование проектирования надежности технических систем по стадиям жизненного цикла. *Аллея науки.* 2018;6(22):1008–1012. https://elibrary.ru/item.asp?id=35370125 (дата обращения 03.10.2023).

6. Лукинова О.В. Совмещение жизненных циклов информационной системы и системы защиты: методологические предпосылки. *Информационное общество.* 2013;5:47–58. http://emag.iis.ru/arc/infosoc/emag.nsf/BPA/1a60e62cfb78a80644257c46002cc40e (дата обращения 03.10.2023).

7. Царев А.М. Поиск резервов увеличения жизненного цикла автоматизированных систем машин на основе создания и применения перекомпонуемых производственных систем. *Проблемы машиностроения и автоматизации.* 2011;3:26–37. https://elibrary.ru/item.asp?id=17244947 (дата обращения 01.10.2023).

8. Gurova O., Tkacheva Y. Systematization of Requirements for Air Conditioning Systems for the Development of OpTimization and Evaluation Criteria. In: *Proceedings of the International Scientific Conference "Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East" (AFE-2022).* E3S Web of Conferences; 2023. P. 05074. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337105074

9. Калинина П.М., Медведев Е.С. Модель интегрированной системы обеспечения качества на этапах жизненного цикла наукоемкого изделия. *Вестник Брянского государственного технического университета.* 2020;12(97):67–71. https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-12-67-71

10. Богомаз С.В. Использование систем управления жизненным циклом в машиностроении. В: *Материалы XXI Всероссийского экономического форума молодых ученых и студентов «Конкурентоспособность территорий». В 8-ми частях.* Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет; 2018. С. 5–8. https://elibrary.ru/item.asp?id=36678151 (дата обращения 03.10.2023).

References

1. Pozin B. The Principles of Life Cycle Supporting System for Mission-Critical System. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS.* 2018;30(1):103–114.

2. Pobirsky EYu, Galaev AS, Filimonov IS. Product Lifecycle Management in the Space-Based Rocket Industry. *Reshetnevskie chteniya*. 2012;2:633–634. https://elibrary.ru/item.asp?id=24376254 (accessed: 03.10.2023) (In Russ.).

3. Bespalov VI, Gurova OS, Lysova EP, Grishin GS. Life Cycle Analysis of Steam and Gas Turbine CHP Plants. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;22(4):25–46. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-32-43 (In Russ.).

4. Abramyan SG, Oganesyan OV, Sibirskii EV. Energy-Efficient Reconstruction at Various Stages of the Construction System Life Cycle. Engineering Journal of Don. 2022;1(85):459–469. http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7430 (accessed: 03.10.2023) (In Russ.).

5. Varnakov DV, Kozlov SYu, Vasilyev AYu. Theoretical Justification for Designing the Technical Systems' Reliability by Stages of the Life Cycle. *Alleya nauki*. 2018;6(22):1008–1012. https://elibrary.ru/item.asp?id=35370125 (accessed: 03.10.2023) (In Russ.).

6. Lukinova OV. Methodology Background of Information System and Security System Lifecycles Combining. Information Society Journal. 2013;5:47–58. http://emag.iis.ru/arc/infosoc/emag.nsf/BPA/1a60e62cfb78a80644257c46002cc40e (accessed: 03.10.2023) (In Russ.).

7. Tsaryev AM. The Search of Reserves for Life Cycle Increasing of Automated Machine Systems Based on the Reconfigurable Manufacturing Systems Creation and Application. 2011;3:26–37. https://elibrary.ru/item.asp?id=17244947 (accessed: 01.10.2023) (In Russ.).

8. Gurova O, Tkacheva Y. Systematization of Requirements for Air Conditioning Systems for the Development of Optimization and Evaluation Criteria. In: *Proceedings of the International Scientific Conference "Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East" (AFE-2022).* E3S Web of Conferences; 2023. P. 05074. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337105074

9. Kalinina PM., Medvedev ES. Model of Integrated System for Quality Support at Life Stages of Science Intensive Product. *Bulletin of Bryansk Technical University*. 2020;12(97):67–71. https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-12-67-71 (In Russ.).

10. Bogomaz SV. The Use of Life Cycle Management Systems in Mechanical Engineering. In: *Proceedings of the XXI All-Russian Economic Forum of Young Scientists and Students "Competitive Capacity of Territories". In 8 Volumes*. Yekaterinburg: Ural State University of Economics; 2018. P. 5–8. https://elibrary.ru/item.asp?id=36678151 (accessed: 03.10.2023) (In Russ.).

Поступила в редакцию 04.10.2023
Поступила после рецензирования 19.10.2023
Принята к публикации 20.10.2023

Об авторах:

Беспалов Вадим Игоревич, заведующий кафедрой «Инженерная защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ScopusID, ORCID, izos-rgsu@mail.ru

Ткачева Юлия Юрьевна, доцент кафедры «Инженерная защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат экономических наук, ORCID, tkachevayu@yandex.ru

Николаев Александр Иванович, заведующий лабораторией «Инженерная защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) ORCID, izos-rgsu@mail.ru.

Заявленный вклад соавторов:
Беспалов В.И. — научное руководство, цели и задачи, формирование концепции.
Ткачева Ю.Ю. — исследования, анализ результатов исследований.
Николаев А.И. — графическое оформление, доработка текста.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 04.10.2023
Revised 19.10.2023
Accepted 20.10.2023

About the Authors:

Vadim I. Bespalov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Environmental Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ORCID, izos-rgsu@mail.ru

Yuliya Yu. Tkacheva, Cand.Sci (Economics), Associate Professor of the Environmental Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, tkachevayu@yandex.ru

Aleksandr I. Nikolaev, Head of the Environmental Engineering Laboratory, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, izos-rgsu@mail.ru.

Claimed contributorship:
Bespalov VI — scientific supervision, aims and objectives, formulating the concept.
Tkacheva YYu — experimental research, analysis of the research results.
Nikolaev AI — graphics, text refining.

Conflict of interest statement: authors do not have any conflict of interest.

Authors have read and approved the final manuscript.

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА





Научная статья

УДК 697.92

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-137-143

Управление жизненным циклом вентиляционной системы строительного объекта

Н.С. Самарская  ✉

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ nat-samars@yandex.ru

Аннотация
Введение. В статье автор рассматривает механическую систему вентиляции как сложную техническую систему, которой можно эффективно управлять на основе модели ее жизненного цикла. Как и любая инженерная система (продукт, изделие, проект), вентиляционная система представляет собой совокупность последовательных стадий. Каждая стадия характеризуется своими видами работ и конечными результатами, требующими принятия управленческих решений. Целью исследования являлась разработка модели жизненного цикла вентиляционной системы.
Материалы и методы. В работе применен метод анализа жизненного цикла сложных технических систем, методы сбора и обработки статистических данных, а также методы системного и сравнительного анализа, обобщения научных и практических результатов.
Результаты исследования. В ходе проведенных исследований автором применен подход «управление жизненным циклом» к вентиляционным системам, и достигнута цель — разработана модель их жизненного цикла, включающая в себя все стадии развития системы от замысла до утилизации. Определены возможные пути управления жизненным циклом вентиляционных систем с позиции непрерывной взаимосвязи процессов.
Обсуждение и заключения. Эффективное управление жизненным циклом системы механической вентиляции может быть реализовано путем разработки программного продукта, способного моделировать процессы и элементы системы уже на первых этапах жизненного цикла. Программный продукт позволит устранить проблему несоответствий, существующих на разных этапах работы, хранить информацию об объекте и обеспечивать доступ к ней каждому участнику процесса. Решение проблемы создания программного продукта обеспечит эффективное управление всем жизненным циклом вентиляционной системы, снизит трудозатраты и устранит несоответствия, а также обеспечит соблюдение современных требований к эксплуатационной надежности и энергоэффективности жизненно важных инженерных систем.

Ключевые слова: жизненный цикл, вентиляционная система, управление жизненным циклом, строительный объект.

Для цитирования. Самарская Н.С. Управление жизненным циклом вентиляционной системы строительного объекта. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):137–143. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-137-143

Original article

Life Cycle Management of a Construction Facility Ventilation System

Natalia S. Samarskaya  ✉

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ nat-samars@yandex.ru

Abstract
Introduction. In the article a mechanical ventilation system is investigated by the author as a complex technical system, which can be efficiently managed based on its life cycle model. Like any engineering system (or a product, article of

manufacture, project), a ventilation system has its own life cycle, consisting of a set of successive stages. Each stage is characterised by the types of work and final results attributed to it, which require managerial decisions. The study aims at developing a life cycle model of a ventilation system.
Materials and Methods. The life cycle analysis method of the complex technical systems, the methods of collecting and processing the statistical data, as well as the system and comparative analysis methods, and the method of synthesis of the scientific and practical results have been used in the research.
Results. Within the research conducted by the author, the "life cycle" approach to management of the ventilation systems had been implemented, and the objective of developing a life cycle model thereof, including all stages of system's evolution, from formation of a concept to disposal, had been achieved. Possible ways of managing the ventilation systems life cycle with respect to the uninterrupted interaction of processes had been defined.
Discussion and Conclusion. The efficient life cycle management of a mechanical ventilation system can be implemented through development of a software product capable of modeling the processes and elements of a system, starting from the very first stages of the life cycle. The software product will be able to eliminate the problem of inconsistencies existing at the different stages of work, will store the information about the object and provide access to it to each participant of the process. Solving the software development problem will ensure efficient management of the entire life cycle of a ventilation system, reduce the labour costs, eliminate the inconsistencies and ensure compliance with the modern requirements for the operational reliability and energy efficiency of the vital engineering systems.

Keywords: life cycle, ventilation system, life cycle management, construction facility.

For citation. Samarskaya NS. Life Cycle Management of a Construction Facility Ventilation System. *Modern Trends in Construction, Urban and Territory Planning.* 2023;2(4):137–143. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-137-143

Введение. Широко известный термин «управление жизненным циклом» продолжает распространяться на разные сферы хозяйственной деятельности. Особенно четко прослеживается важность данного понятия в строительной сфере [1–3]. Авторы научных работ с успехом внедряют теорию жизненного цикла в сферу производства строительных материалов, самих объектов строительства, а также в проекты и инновации [4–8]. Большинство исследователей под «жизненным циклом» объекта понимают определенную последовательность стадий (этапов) его создания, эксплуатации и утилизации. Анализ объекта исследования в контексте жизненного цикла позволяет обеспечить эффективное управление, согласованное с международными стандартами ISO 9000, что обуславливает актуальность такого рода задач. При этом по-прежнему остается чрезвычайно востребованным экологическое сопровождение жизненного цикла строительного объекта, рекомендуемое стандартами ISO 14040. Это связано не только с возможностью оценить интенсивность негативного воздействия на окружающую среду, но и более точно установить энергетические затраты на каждой стадии жизненного цикла. Учитывая положительные результаты многих исследователей, автором применен подход «управление жизненным циклом» к механическим системам вентиляции, которые, как и любая сложная техническая система, имеют свои стадии жизненного цикла. На основе выделенных стадий разработана модель жизненного цикла системы механической вентиляции, и проанализированы преимущества непрерывного управления такой моделью в условиях строительства или эксплуатации объекта.

Материалы и методы. В основу исследований положен метод анализа жизненного цикла сложных технических систем. Автором предложено применить концепцию управления жизненным циклом для механической вентиляционной системы строительного объекта. При этом целью исследований являлась разработка модели жизненного цикла с анализом возможности управления на каждом из этапов. Результаты исследований получены методами системного и сравнительного анализа, сбора и обработки статистических данных, а также аналитического обобщения научных и практических результатов.

Результаты исследования. Очевидно, что жизненный цикл любой системы ограничен определенным периодом времени. По мере своего развития система проходит определенные этапы, на которых реализуются новые возможности, и возникают проблемы и задачи функционирования. Таким образом, можно сформулировать, что жизненный цикл вентиляционной системы — это совокупность взаимосвязанных процессов (стадий) создания, последовательного изменения состояния и утилизации системы, обеспечивающей потребности пользователя в нормативном воздухообмене помещений рассматриваемого объекта. Если в качестве строительного объекта рассматривать производственное здание, то можно заключить, что нормативный воздухообмен могут обеспечить преимущественно механические системы вентиляции, работающие за счет побудителей тяги. Механические вентиляционные системы могут быть приточными, вытяжными или приточно-вытяжными [9–10]. Любой из вариантов системы включает в себя целый комплекс оборудования, предназначенного не только для подачи или удаления воздуха, но и для подогрева, очистки воздуха от загрязняющих веществ. Основными элементами механической вентиляционной системы являются воздуховоды, фасонные изделия

(тройники, повороты, переходники), вентиляторы, калориферы, воздушные фильтры, шумоглушители, решетки, диффузоры, а также возможны дополнительные элементы, такие как системы автоматики, рекуператоры, увлажнители, охладители, осушители воздуха [11–15]. Такой сложный состав механической системы вентиляции связан, прежде всего, с предъявляемыми требованиями к современной системе обеспечения нормативных параметров микроклимата. В настоящее время повышенные требования возникают к энергетической эффективности и эксплуатационной надежности систем обеспечения параметров микроклимата. Также по-прежнему остаются высокими требования к чистоте воздушной среды производственных помещений. Поэтому в таких условиях многозадачности неизбежно возникает потребность в качественном управлении системой вентиляции. Причем не только на стадии эксплуатации, но и на протяжении всего ее жизненного цикла.

Весь жизненный цикл вентиляционной системы можно разделить на три этапа: предварительный, этап эксплуатации, этап модернизации и (или) утилизации (рис. 1).

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОСТИ В СИСТЕМЕ	ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ: РАЗРАБОТКА ТЕХЗАДАНИЯ	ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ
Сбор исходных данных Формирование задачи Выбор основного исполнителя	Готовая стратегия решения задач воздухообмена и воздухораспределения	Готовый проект системы вентиляции для объекта
СТАДИЯ 1	**СТАДИЯ 2**	**СТАДИЯ 3**

В производство

2. ЭТАП ЭКСПЛУАТАЦИИ

МОНТАЖ	ПУСКО-НАЛАДКА	ТО И ОСМОТР	ППР И ИК
Выполнение монтажных работ, проверка герметичности, авторский надзор	отлаженные на проктный воздухообмен системы, ведомость дефектов и их устранение	осмотры, аварийный ремонт, техническое обслуживание	Планово-предупредительный ремонт, инструмент. Контроль
СТАДИЯ 4	**СТАДИЯ 5**	**СТАДИЯ 6**	**СТАДИЯ 7**

3. ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ И (ИЛИ) УТИЛИЗАЦИИ

Задача выбора варианта модернизации: замена части оборудования, воздуховодов.
Ввод новых установок.
Вывод неэффективных установок

СТАДИЯ 8

Рис. 1. Модель жизненного цикла вентиляционной системы
(ППР — планово-предупредительный контроль; ИК — инструментальный контроль)

В свою очередь каждый из этапов жизненного цикла включает в себя некоторое количество стадий. Каждая стадия, являясь частью жизненного цикла, характеризуется определенным состоянием системы, видом предусмотренных работ и их конечными результатами. Исходя из этого, предварительный этап жизненного цикла вентиляционной системы будет состоять из следующих стадий.

Стадия 1 — определение потребности в вентиляционной системе. На данной стадии происходит выявление в целом необходимости устройства механической вентиляционной системы. Происходит сбор исходных данных, формирование задачи, выбор основного исполнителя.

Стадия 2 — разработка технического задания. Исходя из поставленной задачи, происходит формирование готовой стратегии реализации воздухообмена и воздухораспределения для конкретного помещения в виде технического задания.

Стадия 3 — проектирование. Данная стадия характеризует непосредственно сам процесс проектирования, в результате которого получают готовый проект системы вентиляции для объекта строительства. На данной стадии возможна также подготовка проектной организацией руководства по эксплуатации системы.

После третьей стадии жизненного цикла наступает этап эксплуатации вентиляционной системы. При этом монтаж считаем начальной стадией эксплуатации, позволяющей осуществить ввод системы в работу. Этап эксплуатации вентиляционной системы состоит из четырех стадий, предусматривающих разные виды работ и конечные результаты.

Стадия 4 — монтаж. Монтажная организация осуществляет выполнение проекта путем предусмотренных монтажных работ. На этой стадии важна проверка герметичности протяженных веток воздуховодов, а также авторский надзор.

Стадия 5 — пусконаладка. В пусконаладочные работы системы механической вентиляции входят регулировка и наладка отдельных элементов и всей установки в целом, испытания, составление ведомости дефектов и их устранение.

Стадия 6 — техническое обслуживание и осмотр. Стадия подразумевает проведение всех видов технического обслуживания, начиная от осмотров, аварийных ремонтов и заканчивая удаленным контролем силами диспетчеризации.

Стадия 7 — планово-предупредительный ремонт и инструментальный контроль. На данной стадии важна проверка эффективности работы отдельных узлов системы вентиляции, позволяющая выявить дефекты и устранить неисправности.

Спустя некоторое время после седьмой стадии наступает этап модернизации или, в некоторых случаях, утилизации системы. С течением времени производительность системы вентиляции снижается, из-за этого в помещении параметры микроклимата ухудшаются, что может повлечь за собой изменения показателей трудоспособности и здоровья. Снижение эффективности работы вентиляционной системы связано с потерей герметичности в воздуховодах, недостаточным напором воздуха внутри системы, засорением воздуховодов или проблемами с электрическими элементами [16]. Как правило, в таких случаях недостаточно провести ремонтные работы, и требуется модернизация всей системы. Этап модернизации системы совпадает с восьмой стадией жизненного цикла системы.

Стадия 8 — выбор варианта модернизации: замена части оборудования, воздуховодов, ввод новых и вывод неэффективных установок. На стадии модернизации необходима подготовка технического задания на выполнение работ, а также последующий анализ воздуха рабочей зоны и проверка соответствия параметров микроклимата требуемым нормативным значениям. После модернизации система снова возвращается на этап эксплуатации. В случаях выхода вентиляционного оборудования из строя возникает необходимость в утилизации. При этом жизненный цикл вентиляционной системы завершается.

Таким образом, продолжительность жизненного цикла механической вентиляционной системы может достигать десятков лет от замысла до полной утилизации. За это время инженерная система проходит множество состояний, и даже после вывода из эксплуатации система продолжает существовать в виде отходов. В таких условиях, в отличие от управления отдельными процессами, управление всем жизненным циклом вентиляционной системы представляется более эффективным.

Общепринятое управление отдельными процессами приводит в конечном итоге к возникновению несоответствий одних результатов процессов развития системы другим. Такие несоответствия появляются из-за неполной информации о системе и ее прогнозируемом далее по жизненному циклу состоянию. Несоответствия могут возникнуть на любой стадии жизненного цикла вентиляционной системы:

– на первой стадии оценка стоимости работ и оборудования может не соответствовать текущей предполагаемой конструкции;

– реализуемые разработчиками проектные решения могут противоречить действительным нуждам заказчика;

– на третьей стадии проектные решения комплектующего оборудования могут не совпадать с имеющимся в наличии и доступным для закупки;

– ошибки и несоответствия могут возникнуть и на стадии монтажа. Часть фасонных элементов может не быть закупленной, или предусмотренные крепежи не выдержат нагрузку;

– на стадии эксплуатации несоответствия и ошибки проектирования проявляются особенно явно — нехватка тех или иных элементов вентиляционной системы создает большие трудности в эффективной эксплуатации и требует принятия определенных решений.

Таким образом, чем позже по жизненному циклу обнаружено несоответствие, тем сложнее и дороже его исправить. В связи с этим главной идеей управления жизненным циклом вентиляционной системы будет использование непротиворечивого представления всей системы в процессе ее развития. Достичь такого представления на сегодняшний день можно, отказавшись от бумажного проектирования и множества электронных файлов, используя программный продукт, позволяющий моделировать элементы вентиляционной системы и хранящий всю информацию о ней, доступную каждому участнику процессов жизненного цикла. Именно такой переход к структурно представляемым моделям уже на первой стадии жизненного цикла будет сокращать несоответствия путем компьютерной обработки данных.

Обсуждение и заключения. Управление жизненным циклом вентиляционной системы — это не только программный продукт, это определенный способ организации работ, который позволит экономить человеческие усилия. В ходе разработки любое описание вентиляционной системы, любая ее модель изменяются и дополняются многократно, поэтому существует множество альтернативных версий, в разной мере соответствующих друг другу. Процесс управления жизненным циклом должен гарантировать, что для текущей работы используется только правильное сочетание этих версий.

В нынешних условиях развития информационных технологий реализация процесса управления жизненным циклом вполне осуществима. Для этого должна быть обеспечена возможность передачи данных от одного приложения к другому, поэтому основной задачей остается разработка программного продукта, позволяющего реализовать управление жизненным циклом вентиляционной системы. Для создания эффективного программного продукта по управлению жизненным циклом вентиляционной системы можно выделить следующие критерии:

– возможность обнаружения ошибок и несоответствий на каждой стадии жизненного цикла;

– возможность финансово и интеллектуально освоить технологию управления жизненным циклом системы вентиляции;

– масштабируемость и возможность доступа для всех участников процессов жизненного цикла.

Можно заключить, что в результате выполненных исследований применен подход «управление жизненным циклом» к механическим системам вентиляции, решена задача построения модели жизненного цикла для них, и определены пути реализации процесса управления стадиями создания, последовательного изменения состояния и утилизации системы. А также выявлены преимущества анализа жизненного цикла как совокупности взаимосвязанных процессов по сравнению с рассмотрением каждого вида работ по отдельности, влекущим за собой множество несоответствий.

Список литературы

1. Бегларян К.Э. Теоретические аспекты анализа жизненного цикла предприятия. *Научная палитра.* 2020;2(28):14.

2. Schiller S., Landwehr M., Vinogradov G., Dimitriadis I., Akyürek H., Lipp J., et al. Towards Ontology-based Lifecycle Management in Blisk Manufacturing. *Procedia CIRP.* 2022;112:280–285, URL: https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.085

3. Leng J., Ruan G., Jiang P., Xu K., Liu Q., Zhou X., et al. Blockchain-empowered Sustainable Manufacturing and Product Lifecycle Management in Industry 4.0: A Survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2020;132:110112. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110112

4. Stark J. *Product Lifecycle Management (Volume 1) 21st Century Paradigm for Product Realisation.* Cham: Springer International Publishing; 2022. 32 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98578-3_1

5. Khajavi S.H., Motlagh N.H., Jaribion A., Werner L.C., Holmström J. Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buidings. *IEEE Access.* 2019;7:147406–147419. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946515

6. Абрамян С.Г., Бурлаченко О.В., Оганесян О.В, Бурлаченко А.О. Система управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием цифровых технологий. *Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та.* 2021;4(85):305–314.

7. Беляев А.В., Антипов С.С. Жизненный цикл объектов строительства при информационном моделировании зданий и сооружений. *Промышленное и гражданское строительство.* 2019;1:65–72.

8. Иштрякова Т.Р. Сравнение отечественного и зарубежного подходов к управлению жизненным циклом объектов строительства. *Актуальные вопросы современной экономики.* 2020;5:296–301.

9. Cao Zhixiang., Zhai C., Wang Y., Zhao T., Wang H. Flow Characteristics and Pollutant Removal Effectiveness of Multi-vortex Ventilation in High Pollution Emission Industrial Plant with Large Aspect Ratio. *Sustainable Cities and Society.* 2020;54:101990. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101990

10. Murga A., Long Z., Yoo S.-J., Sumiyoshi E., Ito K. Decreasing Inhaled Contaminant Dose of a Factory Worker Through a Hybrid Emergency Ventilation System: Performance Evaluation in Worst-case Scenario. *Energy and Built Environment.* 2020;1(3):319–326. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.04.007

11. Meng X., Wang Y., Xing X., Xu Y. Experimental Study on the Performance of Hybrid Buoyancy-driven Natural Ventilation with a Mechanical Exhaust System in an Industrial Building. *Energy and Buildings.* 2020;208:109674. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109674

12. Chen C., Lai D., Chen Q. Energy Analysis of Three Ventilation Systems for a Large Machining Plant. *Energy and Buildings.* 2020;224:110272. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110272

13. Миргалимова Г.А. Энергосбережение в системе вентиляции. В: *Материалы Всерос. студ. науч. конф. «Безопасность в электроэнергетике и электротехнике», посвященной 90-летию УГПИ-УдГУ.* Ижевск; 2021. С. 97–102.

14. Сиплевич А.В., Жемчугова Е.Ю. Усовершенствование системы вентиляции рабочей зоны промышленного предприятия. В: *Материалы Международной научно-практической конференции «Экологические проблемы региона и пути их разрешения»*. Омск; 2021. С. 117–120.

15. Иванова В.Р., Новокрещенов В.В., Роженцова Н.В. Разработка алгоритма для эффективного управления технологическим процессом промышленного предприятия на базе программируемого логического контроллера TM171PDM27S Schneider Electric. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* 2020;22(2):75–85. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-75-85

16. Данилова С.С. Технико-экономическая эффективность теплоутилизационных установок в вентиляционных системах. *Вестник науки.* 2023;2(59):208–212. URL: https://www.xn----8sbempclcwd3bmt.xn--p1ai/archiv/journal-2-59-2.pdf (дата обращения: 12.11.2023).

References

1. Beglaryan KE. Theoretical Aspects of Enterprise Life Cycle Analysis. *Nauchnaya palitra*. 2020;2(28):14. (In Russ.).

2. Schiller S, Landwehr M, Vinogradov G, Dimitriadis I, Akyürek H, Lipp J, et al. Towards Ontology-based Lifecycle Management in Blisk Manufacturing. *Procedia CIRP*. 2022;112:280–285, URL: https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.085

3. Leng J, Ruan G, Jiang P, Xu K, Liu Q, Zhou X., et al. Blockchain-empowered Sustainable Manufacturing and Product Lifecycle Management in Industry 4.0: A Survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;132:110112. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110112

4. Stark J. *Product Lifecycle Management (Volume 1) 21st Century Paradigm for Product Realisation*. Cham: Springer International Publishing; 2022. 32 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98578-3_1

5. Khajavi SH, Motlagh NH, Jaribion A, Werner LC, Holmström J. Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buidings. *IEEE Access*. 2019;7:147406–147419. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946515

6. Abramyan SG, Burlachenko OV, Oganesyan OV, Burlachenko AO. The Life Cycle Management System for the Capital Construction Objects Using Digital Technologies. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2021;4(85):305–314. (In Russ.).

7. Belyaev AV, Antipov SS. Life Cycle of Construction Objects at Information Simulation of Buildings and Structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2019;1:65–72. (In Russ.).

8. Ishtryakova TR. Comparison of Domestic and Foreign Approaches to Managing the Life Cycle of Construction Objects. *Current Issues of the Modern Economy.* 2020;5:296–301. (In Russ.).

9. Cao Zhixiang, Zhai C, Wang Y, Zhao T, Wang H. Flow Characteristics and Pollutant Removal Effectiveness of Multi-vortex Ventilation in High Pollution Emission Industrial Plant with Large Aspect Ratio. *Sustainable Cities and Society*. 2020;54:101990. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101990

10. Murga A, Long Z, Yoo SJ, Sumiyoshi E, Ito K. Decreasing Inhaled Contaminant Dose of a Factory Worker Through a Hybrid Emergency Ventilation System: Performance Evaluation in Worst-case Scenario. *Energy and Built Environment.* 2020;1(3):319–326. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.04.007

11. Meng X, Wang Y, Xing X, Xu Y. Experimental Study on the Performance of Hybrid Buoyancy-driven Natural Ventilation with a Mechanical Exhaust System in an Industrial Building. *Energy and Buildings*. 2020;208:109674. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109674

12. Chen C, Lai D, Chen Q. Energy Analysis of Three Ventilation Systems for a Large Machining Plant. *Energy and Buildings*. 2020;224:110272. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110272

13. Mirgalimova GA. Energy Saving in the Ventilation System. In: *Proceedings of the All-Russoan Student Scientific Conference Dedicated to the 90th Anniversary of UGRI-UdGU*. Izhevsk; 2021. P. C. 97–102. (In Russ.).

14. Siplevich AV, Zhemchugova EYu. Improvement of the Ventilation System of the Working Area of an Industrial Enterprise. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Environmental Problems of the Region and Ways to Resolve Them".* Omsk; 2021. P. 117–120. (In Russ.).

15. Ivanova VR, Novokreshenov VV, Rozhencova NV. Development of an Algorithm for Effective Management of the Technological Process of the Industrial Enterprise Based on the Programmable Logic Controller Tm171pdm27s Schneider Electric. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):75–85. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-75-85 (In Russ.).

16. Danilova SS. Technical and Economic Efficiency of Heat Recovery Units in Ventilation Systems. *Vestnik Nauki*. 2023;2(59):208–212. URL: https://www.xn----8sbempclcwd3bmt.xn--p1ai/ar-chiv/journal-2-59-2.pdf (accessed: 12.11.2023). (In Russ.).

Поступила в редакцию 12.10.2023
Поступила после рецензирования 26.10.2023
Принята к публикации 29.10.2023

Об авторе:

Самарская Наталья Сергеевна, доцент кафедры «Инженерная защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ScopusID, ORCID, nat-samars@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Received 12.09.2023
Revised 26.10.2023
Accepted 29.10.2023

About the Author:

Natalia S. Samarskaya, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Environmental Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ORCID, nat-samars@yandex.ru

Conflict of interest statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.